FIZYKA
w Szkole z Astronomią

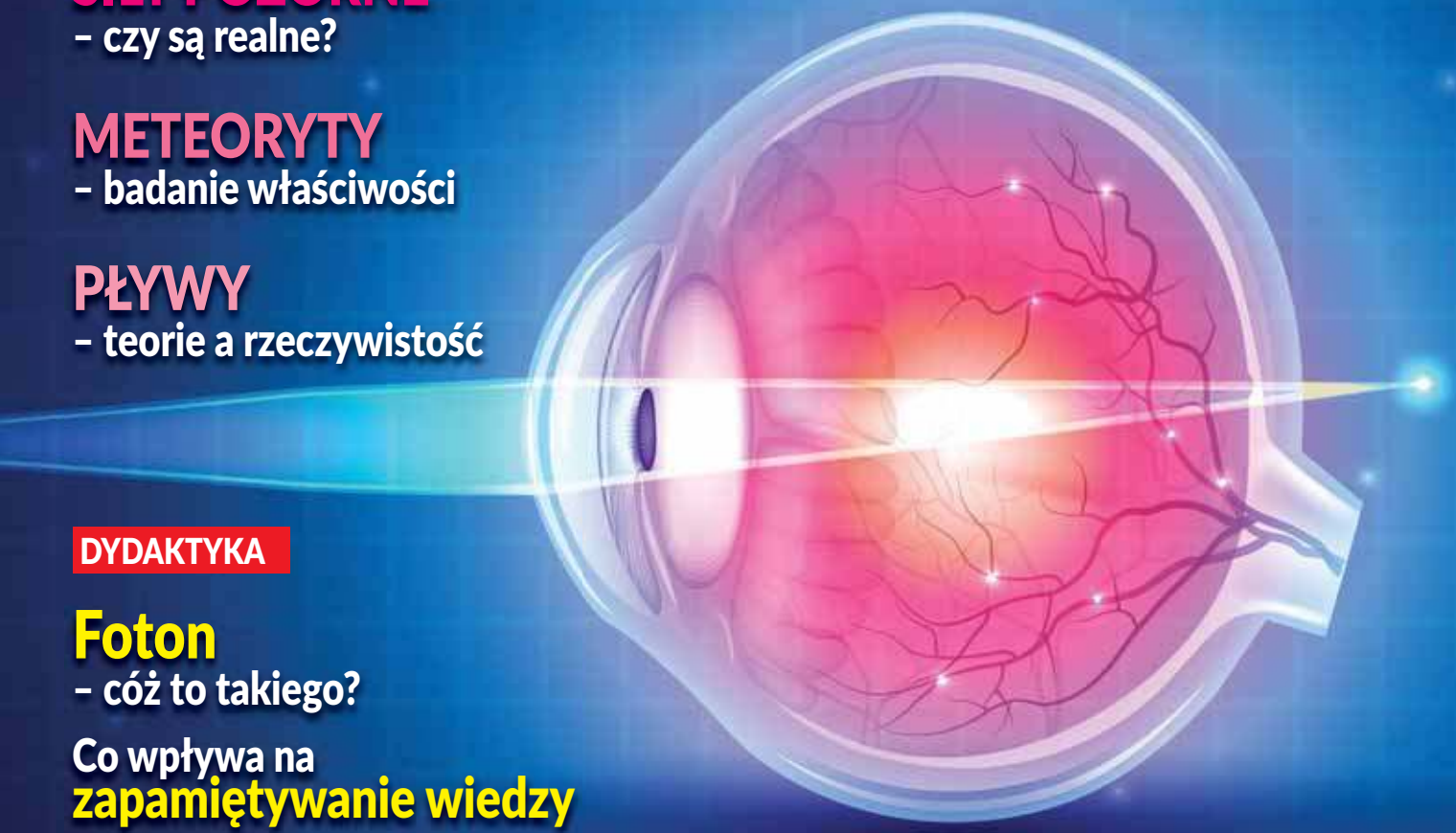
CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

365 (LXIV) indeks 35810X **Nr 6 listopad/grudzień 2019** CENA 27,50 zł (w tym 8% VAT)

SIŁY POZORNE
– czy są realne?

METEORYTY
– badanie właściwości

PŁYWY
– teorie a rzeczywistość



DYDAKTYKA

Foton
– cóż to takiego?

Co wpływa na
zapamiętywanie wiedzy

Życie
bez grawitacji

Wzrok
– tajniki optyki i budowy oka

ISSN 0426-3383

epfrasa.pl 6365cfbfa2

Co, jak i dlaczego?

- ✔ Co wskazuje elektroskop?
- ✔ Jak zagotować wodę, nie podgrzewając jej?
- ✔ Czy energia może zniknąć?
- ✔ Czy satelity stacjonarne są rzeczywiście stacjonarne?
- ✔ Czy można zobaczyć siłę?
- ✔ Jak zmierzyć częstotliwość ruchu skrzydełek pszczoły?
- ✔ Dlaczego opony w samochodach Formuły 1 są szerokie?
- ✔ Jak powstaje deszcz? A jak powstaje burza?
- ✔ Dlaczego w Ziemi jest więcej żelaza niż złota?
- ✔ Czy elektrony stanowiące prąd elektryczny płyną do nas z elektrowni?
- ✔ Jak obliczyć rozmiary atomu?
- ✔ Jak długo zachodzi Słońce?

Wydanie specjalne
w wersji elektronicznej
(plik PDF)
Tylko 15 zł!

Formularz zamówienia na stronie: www.aspress.com.pl/specjalne/

eprasa.pl 6365cibla2

Drodzy Czytelnicy!

Ponieważ jest to ostatni numer „Fizyki w Szkole” w roku 2019 i w Państwa ręce trafi on w okolicach Świąt Bożego Narodzenia, więc niniejszym składam Państwu życzenia zdrowych pogodnych i rodzinnych świąt. Jednocześnie jak zwykle chciałbym zachęcić do lektury naszego magazynu. Na początku chciałbym polecić Państwu artykuł „Od biofizyki układu wzrokowego do złudzeń optycznych”. Właściwie sam tytuł mówi o czym jest artykuł. Autor tym razem skupił się na działaniu narządu, dzięki któremu pobieramy 90% informacji - naszego oka. Autor omówił bardzo szczegółowo jego budowę, sposób w jaki rozpoznajemy barwy. Na przykład wyjaśnił istotę koloru czarnego. Omówione zostały też procesy interpretowania informacji świetlnej przez mózg. Szczególnie dużo uwagi poświęcono iluzjom optycznym. Ten temat nigdy nie jest nudny. Innym zaskakującym zjawiskiem są paradoksy.

Paradoksy nie są złudzeniami. Istnieją naprawdę, ale są trudne do pogodzenia ze zdrowym rozsądkiem i to im poświęcony jest kolejny artykuł pt. „Paradoksy szczególnej teorii względności” Jest to już ostatni artykuł z tego cyklu.

Z zagadnień dydaktycznych na uwagę zasługuje artykuł Andrzeja Sokołowskiego. Autor zajmuje się w nim jednym z najważniejszych problemów dydaktycznych. Otóż analizuje on zagadnienia związane z procesami zapamiętywania. Nie muszę mówić, jak ważny jest to proces. W końcu wszyscy chcemy, aby uczniowie coś z naszych lekcji zapamiętali.

Kończąc jak zwykle życzę miłej lektury.

W imieniu redakcji
Zbigniew Wiśniewski

Spis treści

20 **„Zagubiona przyszłość”, czyli o realności sił pozornych** ¢ Tadeusz Wibig

Na małych karuzelach na placach zabaw dla małych dzieci stoją czasem platformy, które można obracać wedle woli. Każdy wie, że jeśli bardzo się je rozkręci, ci którzy nie trzymają się bardzo mocno zaczną spadać (od środka). Dla kręcących się dzieci siła odśrodkowa nie stanowi problemu. A potem idą do szkoły i okazuje się, że świat jest bardziej skomplikowany, niż się przypuszcza.

Fizyka wczoraj, dziś, jutro

4 **Od biofizyki układu wzrokowego do złudzeń optycznych** ¢ Tomasz Kubiak

11 **Paradoksy szczególnej teorii względności. Część VI** ¢ Jan Kurzyk

Z naszych lekcji

18 **Życie bez grawitacji** ¢ Arleta Biegańska

27 **Czynniki wpływające na zapamiętywanie wiedzy. Wnioski z aktualnych badań i wskazówki dydaktyczne** ¢ Andrzej Sokołowski

30 **Foton – cóż to takiego?** ¢ Waldemar Reńda

32 **Wojewódzki Konkurs Fizyczny (wkf) w szkole podstawowej** ¢ Alicja Szymańska

Geofizyka

36 **Badanie właściwości fizyko-chemicznych meteorytu za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego** ¢ Marcin Wesołowski, Wioletta Kondziołka

Jest całkiem możliwe, że niektóre meteoryty spadające na Ziemię pochodzą z innego układu planetarnego. Warto szczegółowo analizować i badać strukturę meteorytu, ponieważ znajdujemy w nich mikroskopijne cząstki stałe powstałe przed powstaniem naszego Układu Słonecznego.

44 **Ziemia planeta wyjątkowa – cz. 10. Oceany** ¢ Zbigniew Wiśniewski

Ziemia oglądana z Kosmosu, a ściśle z perspektywy satelitów ją otaczających, jest kolorowa z przewagą niebieskiego. Ten kolor wynika z obecności oceanów. Czym są oceany?

48 **Pływy** ¢ Jerzy Kuczyński

FIZYKA w Szkole z Astronomią
CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI
NUMER 6 LISTOPAD/GRUDZIEŃ 2019 Nakład 3000 egz. CENA 27,50 zł (w tym 8% VAT)
365 (LXII) indeks 35810X ISSN 0426-3383

Komitet redakcyjny Krystyna Jabłońska-Ławniczak, Jerzy Kreiner, Andrzej Majhofer (Przewodniczący Komitetu), Zygmunt Mazur, Andrzej Szymacha, Mirosław Trociuk
Redakcja Zbigniew Wiśniewski (redaktor prowadzący – fizykcs@wp.pl) Adres redakcji ul. Warchałowskiego 2/58, 02-776 Warszawa Wydawnictwo Agencja AS Józef Szewczyk, ul. Warchałowskiego 2/58, 02-776 Warszawa, e-mail: szewczyk24@gmail.com, tel. 606 201 244, www.aspress.com.pl, NIP: 951-134-91-51 Wydawca i redaktor naczelny Józef Szewczyk, szewczyk24@gmail.com Prenumerata www.aspress.com.pl/prenumerata-2020/, e-mail: szewczyk24@gmail.com, tel. 606 201 244 Reklama Jędrzej Chodakowski, jchodakowski1953@gmail.com Skład i łamanie Vega design Druk i oprawa Paper & Tinta, ul. Ceglana 34, 05-270 Nadma
Zdjęcie na okładce i wspisie treści: Adobe Stock.

Redakcja nie zwraca nadesłanych materiałów, zastrzega sobie prawo formalnych zmian w treści artykułów i nie odpowiada za treść płatnych reklam.

Zapraszamy do odwiedzenia naszej strony w Internecie www.aspress.com.pl

Od biofizyki układu wzrokowego do złudzeń optycznych

Czytelnicy „Fizyki w Szkole" już wiele razy mogli przekonać się, że biofizyka pomaga nam odkrywać tajemnice ludzkiego organizmu i w sposób ilościowy opisywać procesy związane z jego funkcjonowaniem. Dzieje się tak również w przypadku układu wzrokowego, dzięki któremu dociera do nas około 80% informacji o otoczeniu.

Tomasz **Kubiak**

Budowę gałki ocznej zna zapewne większość z nas, ale należy uświadomić sobie, że struktury odpowiedzialne za odbiór bodźców świetlnych i ich transformację na sygnały elektryczne tylko rozpoczynają proces widzenia. Analiza impulsów nerwowych, rozpoznawanie oraz rozumienie treści obrazów to zadanie struktur mózgowych współdziałających z wyższymi obszarami korowymi. Błędna interpretacja informacji sensorycznej prowadzi natomiast do złudzeń optycznych, które od wieków zaskakują a jednocześnie intrygują ludzi.

Zacznijmy jednak od początku, czyli od fal elektromagnetycznych docierających do naszego oka. W przypadku ludzi interesują nas oczywiście tylko te z zakresu widzialnego, tzn. o długościach fali zawierających się w przedziale 380 – 760 nm. Dociekliwi zadadzą zapewne pytanie, dlaczego oko nie odbiera fal krótszych czy dłuższych. Przypomnijmy sobie jednak, że promieniowanie ultrafioletowe może generować szkodliwe dla nas wolne rodniki, więc jest ono eliminowane przez rogówkę (UVC i UVB dla $\lambda < 295$ nm) oraz soczewkę (UVB oraz UVA).

W przypadku podczerwieni sytuacja jest odmienna, bowiem promieniowanie to posiada niewystarczającą energię fotonów, aby wzbudzić receptory siatkówki. Poza tym należy pamiętać, że wewnętrzna część oka oraz całe nasze ciało, posiadające temperaturę około 36,6° C, same też emitują promieniowanie cieplne. Gdyby zatem miało ono być rejestrowane, stanowiłoby swego rodzaju szum i ulegalibyśmy samooślepianiu.

Oko jako narząd wzroku

Gałki oczne o kształcie zbliżonym do kuli i średnicy około 2,4 cm są osadzone symetrycznie w głowie, a zatem wysoko nad ziemią, co zapewnia nam możliwość obserwacji rozległej przestrzeni. Wysunięty w stosunku do oczodołu łuk brwiowy stanowi swego rodzaju osłonę słoneczną, czyli zapobiega, aby promienie świetlne padające pod dużym kątem do osi optycznej nie wpadały do oka. Ulegałyby one bowiem rozproszeniu wewnątrz gałki ocznej i pogarszały kontrast obrazu siatkówkowego. Jak jednak obraz ten w ogóle powstaje? Aby odpowiedzieć na to pytanie, przyjrzyjmy się budowie oka (rys.1) i przeanalizujmy działanie jego układu optycznego, posługując się prawami optyki geometrycznej.

Celem niniejszego artykułu nie jest oczywiście dokładne opisanie struktur anatomicznych narządu wzroku. Niemniej jednak warto wspomnieć, iż ściana gałki ocznej posiada budowę warstwową. Zlokalizowana od strony zewnętrznej gruba, nieprzezroczysta twardówka pełni funkcję ochronną, gdyż buduje ją wytrzymała i elastyczna tkanka łączna włóknista. W przedniej części oka twardówka przechodzi natomiast w wypukłą, przezroczystą rogówkę. Właśnie przez tę strukturę światło wpada do oka. Jej zabezpieczenie stanowi powieka, czyli umięśniony fałd skórny. Pozwala on ograniczać dopływ światła oraz stanowi zaporę dla kurzu i ciał obcych, zamykając się odruchowo, gdy do oka zbliża się

eprasa.pl 6365cfbfa2

jakiś niepożądany okruch. Wydzielany przez gruczoły łzowe płyn zwilża gałkę oczną i wymywa drobiny, które przypadkowo dostały się pod powiekę. Oprócz wody oraz chlorku sodu zawiera on białka, w tym działający bakteriobójczo lizozym. Podczas mrugania płyn łzowy rozprowadzany jest po powierzchni rogówki a następnie paruje bądź z wewnętrznego kącika oka spływa przez kanały łzowe oraz dalsze struktury anatomiczne do jamy nosowej.

Składająca się z kilku warstw rogówka posiada średnicę około 11,5 mm i jest grubsza w części obwodowej (≈1 mm) niż w środkowej (0,5-0,6 mm). Warto wspomnieć, iż jej średnia zdolność skupiająca wynosząca +42 dioptrie stanowi około 2/3 mocy łamiącej całego oka. Promienie świetlne ulegają na niej refrakcji (współczynnik załamania n = 1,376) i dalej biegną już bez zmiany kierunku przez wypełnioną cieczą wodnistą komorę przednią oka (n = 1,336) a następnie przechodzą przez źrenicę, czyli prawie okrągły otwór w tęczówce. Ta ostatnia znana jest wszystkim głównie ze względu na zawartość pigmentów determinujących kolor oczu. Funkcjonalnie stanowi natomiast przysłonę ograniczającą ilość światła, które dostaje się do wnętrza oka.

Dzięki dwóm działającym antagonistycznie układom włókien mięśniowych tęczówki możliwa jest właśnie zmiana wymiarów wspomnianej już źrenicy. W warunkach słabego oświetlenia wyraźnie się ona rozszerza, natomiast przy ekspozycji na silne światło istotnie zwęża (fot. 1). Zaobserwowano, że przy skrajnej różnicy w warunkach oświetleniowych jej średnica może zmieniać się od 2 do 8 mm, regulując natężenie przechodzącego światła o około 15 dB. Należy jednak pamiętać, że reakcja źrenicy wcale nie stanowi głównego czynnika przystosowania oka do rozmaitych warunków oświetleniowych (pełen zakres regulacji to ok. 160 dB). Drugim mechanizmem jest bowiem przesunięcie progu wrażliwości siatkówki na światło.

Za tęczówką zlokalizowana jest dwuwypukła (promień przedniej krzywizny ≈ 10 mm, natomiast tylnej ≈ 6 mm), przezroczysta soczewka zbudowana z warstw cechujących się różnymi gęstościami optycznymi. Charakteryzująca ją wartość współczynnika załamania różnicuje się, w części centralnej wynosząc n = 1,41, natomiast w regionach zewnętrznych n = 1,33.

Kształt soczewki może się zmieniać, co jest związane z działaniem mięśni rzęskowych. Oko ulega akomodacji, dzięki czemu na siatkówce można skupić promienie świetlne docierające od przedmiotów znajdujących się w różnych odległościach, a tym samym zapewnić ich ostre widzenie. Gdy obiekt zlokalizowany jest bardzo daleko, biegnące od niego promienie świetlne są w przybliżeniu równoległe, zatem wymagają mniejszego ugięcia przez soczewkę.[1] Przybiera ona postać bardziej spłaszczoną niż w przypadku, gdy docierają do niej rozbieżne promienie od blisko położonych przedmiotów (wówczas soczewka musi stać się bardziej wypukła, zwiększając swą zdolność skupiającą).

Rys. 1 Uproszczony schemat budowy oka miarowego. Równoległa do osi optycznej wiązka światła skupiana jest na siatkówce a punkt daleki P_D znajduje się w nieskończoności.

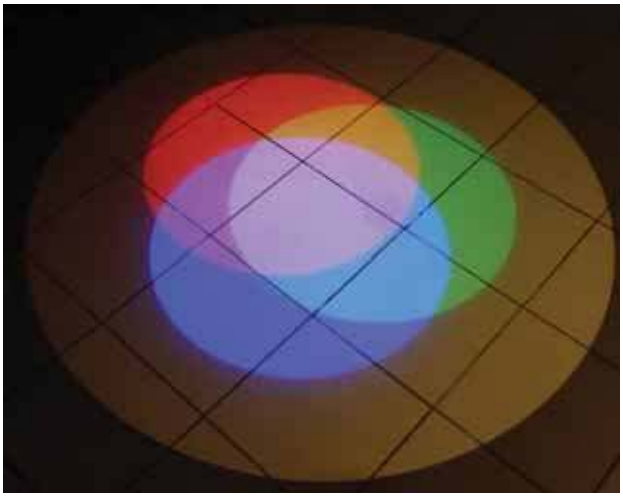
Fot. 1. Źrenica rozszerza się w warunkach słabego oświetlenia, natomiast zwęża, gdy ilość światła docierającego do oka jest duża.

Warto nadmienić, że u ryb mechanizm akomodacji jest zupełnie inny, gdyż zmianie ulega nie krzywizna soczewki, a jej odległość od tylnej ściany oka. Skupmy się jednak na opisie funkcjonowania narządu wzroku u ludzi. Promienie świetlne po przejściu przez soczewkę biegną dalej przez ciało szkliste (n = 1,336) i trafiają na siatkówkę. Dla czytelników nie będzie zaskoczeniem, jeśli napiszę, że ta struktura również składa się z warstw. Mniej oczywisty wydaje się natomiast fakt, że światło, aby zostać zarejestrowane, musi najpierw minąć komórki zwojowe i dwubiegunowe. Fotoreceptory, czyli pręciki i czopki, są bowiem położone głębiej. Stanowią swoiste detektory i w odpowiedzi na światło generują odpowiednie impulsy nerwowe.

Sygnały z tzw. pól recepcyjnych, za pośrednictwem wspomnianych już komórek dwubiegunowych, trafiają do komórek zwojowych, których aksony tworzą biegnący do mózgu nerw wzrokowy. Ostatnią z warstw ludzkiej siatkówki budują natomiast zawierające melaninę komórki barwnikowe. Pochłaniają one światło, które nie zostało

[1] Zdolność skupiająca nieakomodującej soczewki to około 19 dioptrii.

eprasa.pl 6365cfbfa2



Fot. 2. Mieszanie trzech wiązek światła: czerwonego, zielonego i niebieskiego (synteza addytywna).

Fot. 3 Klocki, które w świetle białym mają kolory niebieski i żółty, po umieszczeniu w monochromatycznym świetle czerwonym będą widziane jako odpowiednio czarny i czerwony.

wcześniej zaabsorbowane, przeciwdziałając tym samym jego rozpraszaniu.

Receptory wzrokowe

Siatkówka zawiera wyspecjalizowane fotoreceptory, tj. około 6-7 mln czopków i 100-120 mln pręcików. Pierwsze z wymienionych pozwalają na dzienne widzenie barwne (fotopowe), natomiast drugie na widzenie przy znikomej ilości światła (skotopowe). Rozmieszczenie receptorów na powierzchni siatkówki nie jest regularne. Przykładowo dołek środkowy zawiera wyłącznie czopki, które u człowieka można podzielić na trzy typy w zależności od rodzaju barwników światłoczułych, jakie zawierają. Tak więc cyjanolaby są odpowiedzialne przede wszystkim za odbieranie koloru niebieskiego ze względu na wrażliwość na promieniowanie krótkofalowe i maksymalną czułość odpowiadającą długości fali $\lambda \approx 430$ nm. Z kolei chlorolaby, jak sama nazwa sugeruje, posiadają największą wrażliwość na światło zielone $\lambda \approx 540$ nm.

Ostatni rodzaj czopków to erytrolaby. Najlepiej rejestrują one promieniowanie długofalowe (maksymalna czułość $\lambda \approx 590$ nm). Dzięki nim widzimy m.in. barwę czerwoną.[2] Łatwo możemy zatem zauważyć, że nasz sposób widzenia kolorów odpowiada systemowi RGB (od ang. ***R**ed, **G**reen, **B**lue*), w którym addytywne mieszanie światła czerwonego, zielonego i niebieskiego w odpo-

Fot. 4 Błona odblaskowa występująca u niektórych zwierząt, np. psów, odpowiada za charakterystyczne wrażenie świecenia ich oczu po oświetleniu latarką czy lampą błyskową.

wiednich natężeniach pozwala uzyskać pozostałe barwy (fot. 2).

Wrażenie czerni związane jest natomiast z brakiem promieniowania elektromagnetycznego z zakresu widzialnego w danym obszarze lub jego całkowitym pochłonięciem przez jakieś ciało. Przykładowo, jeśli klocek niebieski oświetlimy monochromatycznym światłem czerwonym, wyda nam się on czarny, z kolei klocek żółty będzie widziany wówczas jako czerwony.[3] Pokazano to na fot. 3. O odbieranej przez nasze oczy barwie obiektu decydują zatem fale elektromagnetyczne od niego odbite bądź na nim rozproszone. Aby poprawnie ocenić kolor danej rzeczy, najlepiej zatem oglądać ją w świetle dziennym, które jest polichromatyczne. Białe przedmioty będą wówczas odbijać światło w całym zakresie widzialnym, pobudzając wszystkie trzy rodzaje czopków.

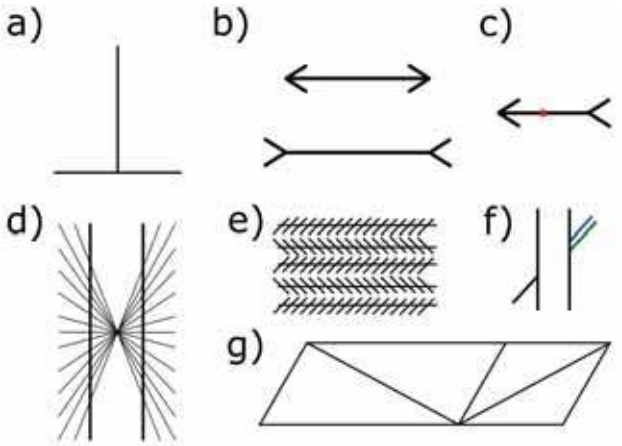
Warto przypomnieć, iż gałka oczna, dzięki sześciu mięśniom zewnątrzgałkowym, może obracać się w oczodole tak, aby przedmioty, na jakich skupiamy wzrok, znalazły swoje odwzorowanie w regionie siatkówki zapewniającym najostrzejszy obraz. Najczulszym obszarem widzenia barwnego jest znajdująca się na osi optycznej plamka żółta o owalnym kształcie. Z kolei w obwodowych obszarach siatkówki zlokalizowane są głównie pręciki, które działają w słabym świetle. Będąc ponad 100 razy bardziej wrażliwe na światło niż czopki, nie pozwalają jednak na rozróżnianie kolorów.

Z doświadczenia wiemy również, że gdy nagle znajdziemy się w ciemności, nasze oczy muszą się do niej przyzwyczaić. Taka adaptacja wymaga przynajmniej 5 minut, aby pręciki osiągnęły odpowiednią skuteczność. Wspomnianym czasem zdecydowanie nie dysponowali natomiast piraci, którzy często z oświetlonego słońcem

[2] Zgodnie z teorią trójchromatyczną Younga-Helmholtza wrażenie barwne powstaje, gdy układ wzrokowy porówna aktywność co najmniej dwóch rodzajów czopków.

[3] Ciało koloru żółtego odbija światło czerwone i zielone.

eprasa.pl 6365cfbfa2



Rys. 2. Klasyczne złudzenia optyczne o charakterze geometrycznym: a) pion-poziom; b) Müllera-Lyera; c) Judda; d) Heringa; e) Zöllnera; f) Poggendorffa; g) Sandera

Fot. 5 Złudzenie Ponzo pokazane na przykładzie pni drzew umieszczonych na tle torów kolejowych.

pokładu swoich żaglowców musieli szybko schodzić do zacienionego wnętrza kadłuba. Rozwiązanie problemu stanowiła dla nich czarna opaska. Wbrew pozorom jej rola nie polegała bowiem na skrywaniu blizn odniesionych w czasie walki, tylko na przyzwyczajaniu jednego z oczu do ciemności. Po szybkim przełożeniu przepaski na drugie z nich korsarze mogli zatem natychmiast podjąć aktywność w miejscu cechującym się znikomym oświetleniem.

Inna ciekawostka wiąże się z kolei z tzw. widzeniem mezopowym, które zachodzi w warunkach przejściowych między dniem a nocą. Jakże często spacerując po ogrodzie w porze zmierzchu odnosimy wrażenie, że niebieskie kwiaty są wyraźnie jaśniejsze niż czerwone. To tzw. zjawisko Purkiniego zaobserwował już w XIX w. czeski fizjolog Jan Evangelista Purkyně, któremu zawdzięcza ono swoją nazwę. Wyjaśnienie wiąże się z faktem, że gdy odpowiednie grupy czopków przestają już działać (najwcześniej erytrolaby), uruchamia się widzenie nocne, a pręciki, zawierające światłoczuły barwnik zwany rodopsyną, są zdecydowanie bardziej wrażliwe na światło o mniejszych długościach fali (krzywa czułości w widzeniu skotopowym posiada maksimum dla $\lambda \approx 505$ nm).

Zwierzęta aktywne nocą, oprócz dużej liczby pręcików, zamiast warstwy barwnikowej posiadają błonę odblaskową (*tapetum lucidum*), zlokalizowaną tuż za siatkówką. Możemy się o tym przekonać, gdy skierujemy na ślepia psa lub kota strumień światła z latarki czy lampy błyskowej i zaobserwujemy w ich źrenicach światło odbite (fot. 4). Do fotoreceptorów w oku zwierzęcia dociera zatem nie tylko światło padające z zewnątrz, ale również odbite od błony odblaskowej. Zwiększa to skuteczność widzenia w warunkach słabego oświetlenia, nieznacznie pogarszając jednak ostrość obrazu.

Dla zainteresowanych warto dodać, że błona odblaskowa u kręgowców wykazuje zróżnicowaną strukturę, a materiał odbijający może znajdować się w cytoplazmie nabłonka siatkówki albo w naczyniówce w bezpośrednim sąsiedztwie naczyń włosowatych.[4] Duża wartość współczynnika odbicia światła dla tapetum lucidum związana jest z kolei z interferencją światła w cienkich warstwach, z których zbudowana jest ta struktura anatomiczna.

Stereopsja

Kolejnym aspektem fizyki widzenia, o którym warto wspomnieć, jest stereopsja. Posiadanie dwóch gałek ocznych (o środkach źrenic odległych od siebie o około 54-74 mm u osób dorosłych) umożliwia nam bowiem percepcję głębi i odległości, czyli widzenie przestrzenne. Każde z naszych oczu patrzy bowiem na obiekt pod nieco innym kątem, a zatem obrazy uzyskiwane na obu siatkówkach są różne. Chociaż indywidualnie każdy z nich jest odwzorowaniem dwuwymiarowym, mózg potrafi złożyć z nich obraz trójwymiarowy.

Prawidłowe widzenie przestrzenne wymaga oczywiście, aby oczy działały w sposób skoordynowany. W tym miejscu czytelnikom „Fizyki w Szkole" mogą przyjść na myśl kolejne pytania. Jeśli gałka oczna między fazami fiksacji wykonuje kilka razy w ciągu sekundy skokowe ruchy, to dlaczego nie rejestrujemy poruszonego obrazu? Podobnie, dlaczego podczas mrugania, gdy źrenica jest przesłonięta przez kilkadziesiąt milisekund, nie tracimy ciągłości widzenia?

Odpowiedzi upatrywać musimy w bezwładności wzroku oraz działaniu naszego mózgu, a konkretnie w tzw. pamięci ikonicznej. Pozwala ona uzupełniać ubytki w obrazie powstałe, gdy nastąpiło krótkotrwałe wyhamo-

[4] Przegląd informacji na temat błony odblaskowej zainteresowani znajdą w pracy: F. J. Ollivier i inni, Comparative morphology of the tapetum lucidum (among selected species), Veterinary Ophthalmology 7(1), (2004), 11-22.

eprasa.pl 6365cfbfa2

wanie impulsów nerwowych przesyłanych nerwem wzrokowym. Przypomnijmy, że nerw ten wychodzi z gałki ocznej z obszaru tzw. plamki ślepej, czyli z miejsca, gdzie nie występują fotoreceptory, a więc siatkówka jest niewrażliwa na światło. Impulsy elektryczne, generowane z określoną częstotliwością przez komórki zwojowe w odpowiedzi na pobudzenie ich pola recepcyjnego (grupy dołączonych fotoreceptorów), przewodzone są do mózgu. Należy przy tym podkreślić, że informacja jest przetwarzana na kolejnych poziomach układu wzrokowego oraz w korze mózgowej. Pierwszorzędowa kora wzrokowa, stanowiąca ostatni element drogi wzrokowej, zlokalizowana jest w płacie potylicznym.

Ustalono jednak, iż bardziej skomplikowana analiza bodźców wzrokowych zachodzi również w wyższych partiach korowych w obrębie płatów skroniowego i ciemieniowego. W mózgu następuje m.in. identyfikacja oglądanych przedmiotów, co najprawdopodobniej odbywa się poprzez porównanie ich z wzorcami dostępnymi w pamięci długotrwałej i przywołanymi do świadomości. Ponadto przy rozpoznaniu obiektu przypisywana jest mu nazwa i odtwarzane są powiązane z nim ślady pamięciowe.

Warto wspomnieć, że proces widzenia obuocznego oraz neuronalne podłoże jego zaburzeń wciąż stanowią intensywny obszar badań naukowców. W swoich pracach wykorzystują oni metody elektrofizjologiczne, przede wszystkim elektroencefalografię (EEG), której poświęcono osobny artykuł w „Fizyce w Szkole”.[5]

Złudzenia wzrokowe i wizualne:

Zagadnienia związane z funkcjonowaniem układu wzrokowego, fizyką widzenia czy procesami postrzegania mogą niekiedy wydawać się skomplikowane. Dlatego, aby wśród uczniów czy studentów wzbudzić zainteresowanie tą tematyką, warto odwołać się do złudzeń optycznych. Zaskakują a jednocześnie fascynują one ludzi, którzy ulegają im bez względu na wiek czy płeć.

Chociaż wiele iluzji jest doskonale znanych od lat, naukowcy wciąż poszukują spójnych teorii wyjaśniających genezę ich powstawania. Warto wspomnieć, iż już około roku 350 p.n.e. grecki filozof Arystoteles zwrócił uwagę na złudzenie, jakiego doświadcza się, obserwując przez dłuższy czas płynącą rzekę a następnie przenosząc wzrok na jakiś spoczywający obiekt. Ten tzw. efekt wodospadu został spopularyzowany znacznie później, bo w 1834 r. przez Roberta Adamsa. Pisał on, że po kilkusekundowym wpatrywaniu się w wodę spadającą z progu skalnego „Falls of Foyers” w Szkocji nagle spojrzał na sąsiadujące skały i odniósł wrażenie jakoby poruszały się one z taką samą szybkością, lecz w górę.

Co ciekawe, przy wyjaśnianiu tego rodzaju iluzji zwraca się uwagę, że pewnego typu neurony, tzw. detektory cech, z czasem adoptują się do bodźca, czyli, we wspomnianym przypadku, do ruchu zachodzącego w określonym kierunku. Po nagłej zmianie punktu obserwacji ich aktywność pozostaje zatem przez chwilę mniejsza w porównaniu z neuronami odpowiedzialnymi za per-

Fot. 6 Księżyc znajdujący się tuż nad horyzontem wydaje nam się większy niż ten będący już wysoko na niebie.

Fot. 7. Oglądane z perspektywy peronu podkłady pod jedną z szyn toru kolejowego wydają się nie pokrywać z podkładami pod drugą z nich, lecz występować naprzemiennie.

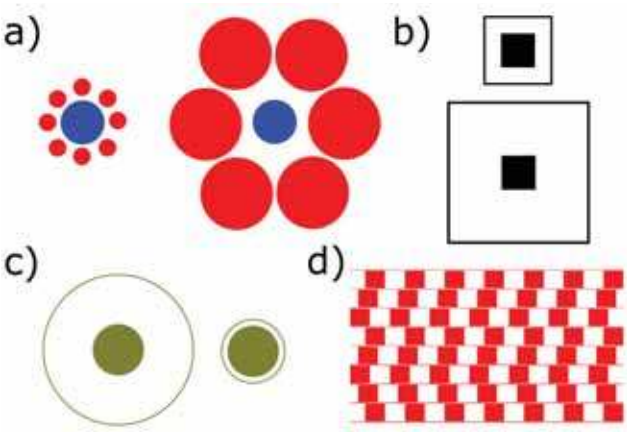
cepcję zmiany położenia obiektów w stronę przeciwną. Przyjmuje się, że jest to przyczyną powstania iluzji, gdyż standardowo podczas oglądania ciał spoczywających pobudzenie obu typów neuronów powinno być jednakowe.

Jeśliby zapytać czytelników, jakie popularne iluzje optyczne przychodzą im na myśl, w pierwszej kolejności wymieniliby zapewne grupę złudzeń, które bazują na podstawowych figurach geometrycznych czy liniach prostych. Zazwyczaj wiążą się one z nieprawidłowym rozpoznaniem właściwości przedstawionych obiektów, np. ich rozmiarów czy kształtu. W najprostszym przypadku wystarczy narysować dwa odcinki o jednakowej długości, tak aby utworzyły odwróconą literę „T” (rys.2a). Można wówczas odnieść wrażenie, że ten zorientowany pionowo jest dłuższy, co opisał już niemiecki fizyk Joseph Oppel w 1855 r.

Równie znane jest złudzenie Müllera-Lyera z 1889 r. (rys. 2b.). Patrząc na parę jednakowych, poziomych odcinków jesteśmy błędnie przekonani, że różnią się one długością tylko dlatego, że dodano do nich ostre lub rozwarte zakończenia. Analogicznie nieprawidłowa ocena jednego z wymiarów występuje w przypadku złudzenia Judda (rys. 2c). Chociaż czerwona kropka dzieli odci-

[5] T. Kubiak, Elektroencefalografia, czyli jak fizyka pomaga odkrywać tajemnice mózgu, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 6 (2016), s. 4 – 6.

eprasa.pl 6365cfbfa2



Rys. 3. Złudzenia: a) Ebbinghausa; b) i c) Delboeufa; d) ściany kawiarni

nek idealnie na pół, dorysowane na jego końcach groty strzałek o zgodnym zwrocie sprawiają, iż obie części nie wyglądają na równe.

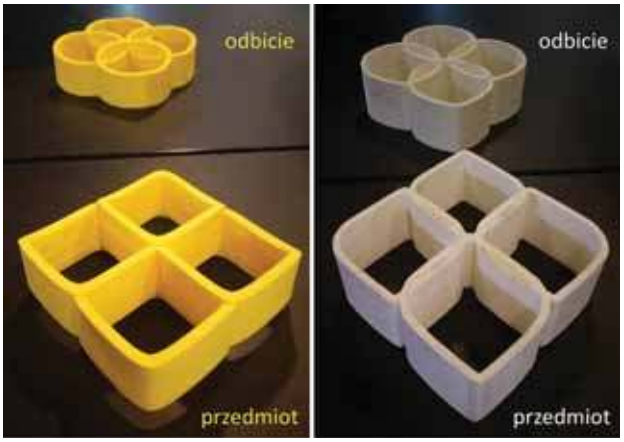
Z kolei fot. 5 nawiązuje do złudzenia, które swą nazwę zawdzięcza włoskiemu psychologowi Mario Ponzo. Jeśli dwie kłody o tych samych rozmiarach zostaną umieszczone na tle biegnącego w dal toru kolejowego, pień zlokalizowany wyżej na rysunku wydaje się być znacznie większy niż jego położony niżej odpowiednik. Warto zauważyć, iż w tym przypadku mamy do czynienia z łamaniem zasad perspektywy linearnej, zgodnie z którą linie biegnące od oka widza powinny zbiegać się w okolicach horyzontu a przedmioty położone dalej być przedstawione jako mniejsze.

Generalnie, linie, które krzyżują się z obserwowanym obiektem mogą istotnie zaburzać ocenę jego właściwości. Klasycznym przykładem jest złudzenie Heringa z 1861 r.[6] Przyglądając się rys. 2d odnosimy mylne wrażenie, iż grubsze wertykalne odcinki są nieco beczkowato wygięte na zewnątrz, czego przyczyną jest umieszczenie ich na tle innych rozchodzących się promieniście ze środka rysunku. Z kolei seria krótkich ukośnych kresek zaburza postrzeganie równoległości dłuższych linii w przypadku iluzji Zöllnera z 1860 r. (rys. 2e).

Warto wspomnieć, iż analiza ilustracji zawartej w manuskrypcie pracy tego niemieckiego astrofizyka zainspirowała jego rodaka Johanna Christiana Poggendorffa, edytora słynnego wówczas periodyku „Annalen der Physik", do odkrycia kolejnego złudzenia. Ukazuje je rys. 2f. Śledząc wzrokiem czarną skośną linię w lewej części rysunku, jesteśmy przekonani, że jej przedłużeniem po prawej stronie jest odcinek zielony, podczas gdy w rzeczywistości to niebieski leży z nią na wspólnej prostej. Po raz kolejny nasze postrzeganie jest zatem zaburzone przez dodatkowe elementy obrazu.

Popatrzymy jeszcze na rys. 2g. Przedstawia on równoległobok podzielony na dwa inne w taki sposób, że krótsza przekątna większego z nich ma dokładnie ten sam wymiar, co dłuższa przekątna mniejszego. Na ilustracji

Fot. 8. Gałęzie drzew obserwowane pod słońce wydają się zdecydowanie cieńsze, a nawet niewidoczne.



Fot. 9 Przykład tzw. dwuznacznych cylindrów, których odbicia odbiegają znacznie od umieszczonych przed lustrem oryginałów.

odcinki te nie wydają się jednak sobie równe, co stanowi ideę iluzji Sandera z 1926 r.

Ciekawa grupa złudzeń optycznych ma związek z naszym postrzeganiem wielkości obiektów. Księżyc w pełni pojawiający się tuż nad horyzontem (fot. 6) wydaje się większy niż w chwili, gdy znajduje się już wysoko na niebie. Takie pozorne zmiany wielkości tarczy naszego naturalnego satelity dostrzegano już w różnych kulturach starożytnych, interesowały też greckiego astronoma Klaudiusza Ptolemeusza. Oczywiście współcześnie możemy posłużyć się instrumentami pomiarowymi, np. teodolitem lub nawet dokonać analizy zdjęć wykonanych aparatem cyfrowym, żeby udowodnić niezależność wielkości obserwowanej tarczy Księżyca od wysokości nad horyzontem. Złudzenie jednak pozostaje a jego wyjaśnienie wciąż rodzi dyskusje, inspiruje do prowadzenia eksperymentów i powstawania kolejnych prac naukowych.

Powszechnie znany jest natomiast inny fakt. Ocena rozmiarów określonego elementu może zostać zaburzona przez wkomponowanie go w zbiór innych obiektów, co ma miejsce m.in. w przypadku iluzji Ebbinghausa[7]. Gdy patrzymy na rys. 3a, wydaje nam się, iż niebieskie

[6] Inną wersją jest złudzenie Wundta z 1898 r., w którym równoległe linie wydają się wygięte do wewnątrz (odwrotnie jak u Heringa).

[7] Iluzja Ebbinghausa nazywana jest czasami kołami Titchenera, gdyż Edward Bradford Titchener spopularyzował ją w literaturze anglojęzycznej.

eprasa.pl 6365cfbfa2

koło po lewej stronie przewyższa rozmiarem analogiczną figurę umieszczoną po prawej, tylko dlatego, że otoczone jest mniejszymi, a nie większymi od siebie, czerwonymi kółkami.

Co ciekawe, złudzenie to jest wyraźnie dostrzegalne, gdy obiekty centralne i otaczające mają ten sam kształt. W życiu nie raz przekonaliśmy się, że oceniamy rozmiar danej rzeczy, porównując ją z innymi obiektami z najbliższego otoczenia. Przykładowo, gdy w restauracji otrzymamy porcję obiadu na bardzo dużym talerzu i zajmuje ona tylko jego środek, często czujemy się rozczarowani. Z drugiej strony, jeśli analogiczna ilość jedzenia wypełniłaby po brzegi mniejsze naczynie, bylibyśmy zapewne usatysfakcjonowani. Ulegamy zatem tzw. złudzeniu Delboeufa, które można oczywiście również zwizualizować w formie geometrycznej chociażby za pomocą czarnych kwadratów znajdujących się w ramkach o odmiennej wielkości (rys. 3b) czy też kół otoczonych przez okręgi o różnej średnicy (rys. 3c).

Nawiązując jeszcze do instytucji gastronomicznych, warto wspomnieć o tzw. złudzeniu ściany kawiarni. Brytyjski psycholog prof. Richard Gregory opisał je zainspirowany wzorem, jaki tworzyły płytki na ścianie pewnej kawiarni w Bristolu. Poziome fugi oddzielające rzędy ułożonych naprzemiennie płytek o dwóch kontrastowych kolorach wydają się być nachylone (a czasami nawet pofalowane), co można zauważyć wpatrując się w rys. 3d.

Uważny obserwator na pewno dostrzeże w swoim otoczeniu wiele ciekawych iluzji optycznych. Autor niniejszego artykułu zwrócił chociażby uwagę na tor kolejowy widziany z perspektywy wysokiego peronu stacji. Oczekujący na pociąg odnosi mylne wrażenie, że podkłady pod jedną szyną nie pokrywają się z tymi pod drugą, lecz występują naprzemiennie (fot. 7). W pierwszej chwili może to budzić skojarzenie ze wspominaną już wcześniej iluzją Poggendorffa, przy czym należy pamiętać, że betonowe podkłady posiadają dodatkowo charakterystyczny, wygięty profil wpływający na odbiór obrazu.

Nie każdy podróżuje koleją, ale zapewne wszyscy przyglądali się kiedyś koronom drzew, szczególnie tym jesiennym czy zimowym pozbawionym liści. Już Leonardo da Vinci dostrzegł, że ich gałęzie obserwowane pod słońce wydają się zdecydowanie cieńsze a nawet niewidoczne (fot.8). Podobnie dzieje się w przypadku przecinających się przewodów napowietrznych linii energetycznych czy sieci trakcyjnych. Obszary jasne pozornie rozszerzają się względem ciemnych, co od czasów Hermanna Helmholtza, nazywane jest zjawiskiem irradiacji. Jego wyjaśnienie początkowo upatrywano tylko w rozpraszaniu światła wewnątrz oka ludzkiego, co skutkowało pobudzaniem fotoreceptorów także z sąsiednich obszarów siatkówki. Obecnie wskazuje się również na odmienną odpowiedź różnych typów neuronów na zmiany oświetlenia obiektów w zależności od tła na jakim się one znajdują (jasnym bądź ciemnym). Warto podkreślić, że podobnie jak w przypadku innych złudzeń naukowcy wciąż dyskutują nad ostateczną teorią wyjaśniającą to zagadnienie.

Czytelników na pewno zainteresuje też fakt, iż badacze nie tylko studiują mechanizmy odpowiedzialne za poznane już iluzje, ale również sami kreują nowe, często rywalizując dodatkowo w konkursie „The Best illusion of the Year".[8] Najlepszym przykładem jest japoński matematyk Kokichi Sugihara.[9] Od 1980 roku tworzy on kolejne generacje tzw. obiektów niemożliwych (ang. *Impossible Objects*).

Szczególnie interesująca wydaje się grupa przedmiotów, których odbicia odbiegają znacznie od umieszczonych przed lustrem oryginałów. Przykładem są dwuznaczne cylindry nagrodzone w 2016 roku. W najprostszym przypadku przekrój poprzeczny pojedynczej tego typu bryły (obserwowanej pod odpowiednim kątem) wydaje się być okrągły, natomiast jej obrazu w zwierciadle płaskim zbliżony do kwadratu, przy czym po rotacji obiektu o 180 stopni sytuacja się odwraca. W rzeczywistości kształt przekroju nie jest ani kwadratem, ani okręgiem, a górne i dolne krawędzie ścian bocznych są dodatkowo pofalowane, co przyczynia się do powstania iluzji.

Czytelników na pewno zainteresuje fakt, że analogiczne a nawet bardziej rozbudowane obiekty geometryczne można wydrukować w technologii 3D (fot. 9) i wykorzystać do celów dydaktycznych, aby nie tylko zaskoczyć, ale również zainspirować uczniów czy studentów do zgłębiania tajników optyki.

dr Tomasz Kubiak

Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Hipolita Cegielskiego w Gnieźnie oraz Poznański Park Naukowo-Technologiczny Fundacji UAM

LITERATURA

[1] J. Młodkowski, Aktywność wizualna człowieka, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.
[2] M. L Kwitko, M. Ross, Oczy. Współczesne metody korekcji zaburzeń widzenia, Warszawa 2003, s. 9 -51.
[3] A. Przekoracka-Krawczyk, P. Jaśkowski, Biofizyka układu wzrokowego [w:] Biofizyka pod red. F. Jaroszyka, PZWL, Warszawa 2008, s. 541-582.
[4] Narząd wzroku [w:] Anatomia i fizjologia człowieka pod. red. A. Michajlika i W. Ramotowskiego, PZWL, Warszawa 2007, s. 549-565.
[5] H. Drozdowski, Oko jako przyrząd optyczny [w:] Fizyczny obraz świata, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 2007, s. 198-209.
[6] K. Hamburger, T. Hansen, K. R. Gegenfurtner, Geometric-optical illusions at isoluminance, *Vision Research* 47 (2007) 3276-3285.
[7] K. Sugihara, Design of solids for antigravity motion illusion, *Computational Geometry* 47 (2014), 675-682.
[8] K. Sugihara, Topology-disturbing objects: a new class of 3D optical illusion, *Journal of Mathematics and the Arts* 12(1), 2018, 2-18.
[9] L. Kaufman, J. H. Kaufman, Explaining the moon illusion, *PNAS*, 97(1), 2000, 500-505.
[10] The Illusions Index, pod red. in F. Macpherson; The Centre for the Study of Perceptual Experience, University of Glasgow; https://www.illusionsindex.org/ (dostęp 15.11.2019).

[8] Nagrodzone iluzje optyczne można obejrzeć na stronie internetowej http://illusionoftheyear.com/ (dostęp 15.11.2019 r.)
[9] Oficjalna strona prof. Kokichi Sugihara: http://www.isc.meiji.ac.jp/~kokichis/Welcomee.html (dostęp 15.11.2019).

eprasa.pl 6365cfbfa2

Paradoksy szczególnej teorii względności
Część VI

Jan **Kurzyk**

W poprzednich częściach artykułu [1-5] opisałem niektóre cechy czasoprzestrzeni. Były to m.in. względność równoczesności [1], względność kolejności zdarzeń [4], zjawisko skrócenia długości [2], zjawisko wydłużenia czasu [4]. Opisałem również związane z tymi zjawiskami eksperymenty myślowe nazywane paradoksami, np. paradoks pociągu i tunelu [2], czy paradoks bliźniąt [5]. W ostatniej części tego cyklu chcę pokazać jak te własności czasoprzestrzeni i ich konsekwencje wynikają z geometrii czasoprzestrzeni.

Czasoprzestrzeń

W mechanice nierelatywistycznej mamy dwie niezależne przestrzenie: jednowymiarową przestrzeń T (oś czasu) i trójwymiarową przestrzeń S. Czasoprzestrzeń możemy interpretować jako iloczyn kartezjański przestrzeni T i przestrzeni S. Każdemu momentowi z przestrzeni T odpowiada punkt w przestrzeni S. W ujęciu nierelatywistycznym czasoprzestrzeń jest płaską przestrzenią Euklidesową. Inaczej mówiąc ma metrykę euklidesową, co oznacza, że odległość pomiędzy dwoma punktami A i B przestrzeni S w danym momencie t liczymy ze wzoru

$$\Delta l_{AB} = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}.$$

Tak określona *metryka* (inaczej odległość lub *interwał przestrzenny*) jest niezmiennicza względem transformacji izometrycznych (czyli zachowujących odległości między punktami) np. transformacji obrotu. Oznacza to, że odległość między punktami A i B będzie taka sama przed transformacją i po niej, chociaż wartości współrzędnych punktów A i B w obu układach są różne.

W mechanice relatywistycznej czasoprzestrzeń jest czterowymiarową przestrzenią o własnościach opisanych przez transformację Lorentza. Interpretację czasu jako czwartej współrzędnej oraz pojęcie czasoprzestrzeni zawdzięczamy niemieckiemu fizykowi i matematykowi Hermanowi Minkowskiemu (1864-1909) [6]. Punkty czasoprzestrzeni nazywamy zdarzeniami. Zdarzeniu możemy przypisać cztery liczby t, x, y, z, które określają miejsce tego zdarzenia w czasoprzestrzeni.

Czy czasoprzestrzeń jest przestrzenią euklidesową? W przestrzeni euklidesowej odległość między punktami wyznaczamy wzorem

$$s_{AB} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (x_{iB} - x_{iA})^2},$$

gdzie N jest wymiarem przestrzeni, a x_{iP} jest i-tą współrzędną punktu P.

Gdyby czasoprzestrzeń była czterowymiarową przestrzenią euklidesową, to odległość między zdarzeniami liczylibyśmy ze wzoru (przypominam, że tak jak w poprzednich częściach artykułu stosujemy układ jednostek, w których prędkość jest bezwymiarowa, a szybkość światła w próżni $c = 1$)

$$s_{AB} = \sqrt{(t_B - t_A)^2 + (x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}.$$

Można łatwo pokazać, że tak określona metryka nie jest poprawna, gdyż nie jest niezmiennikiem transformacji Lorentza. A zatem czasoprzestrzeń nie jest przestrzenią euklidesową.

Spróbujmy znaleźć wzór opisujący odległość między zdarzeniami (punktami w czasoprzestrzeni). Wybierzmy na początek następujące zdarzenia: pierwsze polega na wysłaniu sygnału rozchodzącego się z prędkością światła $c = 1$ z punktu o współrzędnych x_A, y_A, z_A w chwili t_A, drugie zdarzenie polega na dojściu tego sygnału do punktu o współrzędnych x_B, y_B, z_B w chwili t_B. Droga, jaką pokonał sygnał wynosi $(t_B - t_A)$ i musi być równa odległości między punktami

$$\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}.$$

Zależność między tymi zdarzeniami możemy zapisać w postaci

$$(t_B - t_A)^2 - (x_B - x_A)^2 - (y_B - y_A)^2 - (z_B - z_A)^2 = 0.$$

Te same zdarzenia możemy obserwować z układu S'. Ich współrzędne będą miały postać x'_A, y'_A, z'_A, t'_A dla pierwszego zdarzenia i x'_B, y'_B, z'_B, t'_B dla drugiego. W obu układach prędkość światła jest jednakowa, więc w układzie S' również mamy

$$(t'_B - t'_A)^2 - (x'_B - x'_A)^2 - (y'_B - y'_A)^2 - (z'_B - z'_A)^2 = 0.$$

Korzystając z tego wyniku, spróbujmy zdefiniować odległość (*interwał*) między dowolnymi zdarzeniami następująco

$$s_{AB} = \sqrt{(t_B - t_A)^2 - (x_B - x_A)^2 - (y_B - y_A)^2 - (z_B - z_A)^2}.$$

Wzór ten przypomina interwał w przestrzeni euklidesowej, ale trzeba zwrócić uwagę na różne znaki występujące w formie kwadratowej pod pierwiastkiem. Przestrzeń o tego typu metryce nazywamy przestrzenią *pseudoeuklidesową*.

Transformacja Lorentza jako obrót hiperboliczny w czasoprzestrzeni

Jeśli podany powyżej wzór na interwał czasoprzestrzenny jest poprawny, to powinien być niezmienniczy względem transformacji pomiędzy dowolnymi układami inercjalnymi. Zapomnijmy na razie, że taką transformacją jest transformacja Lorentza. Interesują nas jedynie przekształcenia liniowe (gdyż tylko takie nie wyróżniają w przestrzeni i czasie żadnych punktów) oraz izometryczne, czyli nie zmieniające odległości między punktami. Tego typu przekształceniami są jedynie:

eprasa.pl 6365cfbfa2

- symetria osiowa
- symetria punktowa
- przesunięcie równoległe
- obrót.

Symetria osiowa, punktowa, przesunięcie równoległe, ani żadna ich kombinacja nie są w stanie opisać przejścia do układu poruszającego się. Zastanówmy się zatem nad obrotem. Każdy obrót w przestrzeni czterowymiarowej (w naszym przypadku opisywanej współrzędnymi *t, x, y, z*) możemy rozłożyć na sześć obrotów odbywających się w płaszczyznach *xy*, *xz*, *yz*, *tx*, *ty*, *tz*. Obroty w płaszczyznach *xy*, *xz*, *yz* przekształcają jedynie współrzędne przestrzenne. Odpowiadają one zwykłym obrotom w przestrzeni więc nie mogą prowadzić do metryki, jaką przyjęliśmy. Rozpatrzmy zatem obrót w płaszczyźnie *tx*. Nie może to być zwykły obrót (z definicji interwału czasoprzestrzennego wynika, że kwadrat odległości między zdarzeniami może być ujemny!). Rozważmy zatem transformację przypominającą transformację obrotu, w której funkcje trygonometryczne sin i cos zastąpimy funkcjami hiperbolicznymi sinh i cosh [7] z kątem „obrotu hiperbolicznego" równym ψ[8]

$$x = x' \cosh\psi + t'\sinh\psi,$$
$$t = x' \sinh\psi + t'\cosh\psi.$$

Korzystając z tożsamości $\cosh^2 x - \sinh^2 x = 1$ łatwo można pokazać, że zdefiniowany wcześniej interwał czasoprzestrzenny jest niezmiennikiem powyższej transformacji. Spróbujmy znaleźć związek pomiędzy tą transformacją, a ruchem z prędkością *v* wzdłuż osi X. Zajmijmy się ruchem początku układu współrzędnych układu S'. Wówczas $x' = 0$, więc

$$x = 0 \cosh\psi + t'\sinh\psi,$$
$$t = 0 \sinh\psi + t'\cosh\psi.$$

Stąd

$$\frac{x}{t} = \tanh\psi = v.$$

czyli $\tanh\psi = v$.

Z własności funkcji hiperbolicznych wiemy, że

$$\sinh\psi = \frac{v}{\sqrt{1-v^2}},$$
$$\cosh\psi = \frac{1}{\sqrt{1-v^2}}.$$

Stąd

$$\sinh\psi = \frac{v}{\sqrt{1-v^2}},$$
$$\cosh\psi = \frac{1}{\sqrt{1-v^2 x}}.$$

Wobec tego nasza transformacja obrotu hiperbolicznego przyjmuje postać

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1-v^2}}, \quad t = \frac{t' + vx'}{\sqrt{1-v^2}}.$$

Jak widzimy wychodząc z transformacji obrotu hiperbolicznego w płaszczyźnie *xt* otrzymaliśmy klasyczną postać transformacji Lorentza.

Podsumowując, przejście z jednego układu inercjalnego do drugiego poruszającego się względem tego pierwszego możemy uważać za obrót hiperboliczny w czasoprzestrzeni.

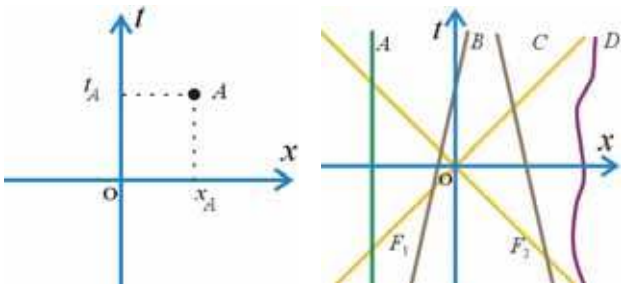
Diagramy Minkowskiego

Nie jesteśmy w stanie w przestrzeni trójwymiarowej narysować układu czterowymiarowego. Musimy ograniczyć się do mniejszej liczby wymiarów. Najczęściej będzie to układ dwuwymiarowy z osią czasową i osią przestrzenną, tą wzdłuż której odbywa się ruch. Taki przekrój czterowymiarowej czasoprzestrzeni wzdłuż płaszczyzny *xt* będziemy nazywać diagramem Minkowskiego.

Na dwuwymiarowym diagramie Minkowskiego zdarzenie, które miało miejsce w chwili t_A w punkcie x_A osi X jest punktem o współrzędnych x_A, t_A (patrz rysunek 1 (a) – zdarzenie *A*). Cząstkom materialnym na diagramach Minkowskiego odpowiadają linie nazywane *liniami świata*. Nieruchoma cząstka reprezentowana jest przez linię prostą równoległą do osi czasu i przecinającą oś przestrzenną w punkcie, w którym cząstka spoczywa (patrz rysunek 1 (b) – linia *A*). Cząstkom poruszającym się ruchem jednostajnym wzdłuż osi X odpowiadają linie proste odchylone od osi czasu w jedną lub drugą stronę zależnie od kierunku ruchu (patrz rysunek 1 (b) – linie *B* i *C*). Linia *B* z rysunku 1 (b) jest linią świata cząstki poruszającej się w kierunku zgodnym z osią X, a linia *C* jest linią świata cząstki poruszającej się w kierunku przeciwnym do zwrotu osi X. Linia świata *D* z rysunku 1 (b) reprezentuje cząstkę poruszającą się ruchem o zmiennej szybkości i zmieniającym się kierunku (czasem zgodnym ze zwrotem osi X, a czasem przeciwnym). Szczególnymi liniami świata są *linie świata fotonów* (patrz rysunek 1 (b) – linie F_1 i F_2). W układzie S kąty między nimi, a osią czasu wynoszą 45° i -45°. Linia F_1 z rysunku 1 (b) reprezentuje foton biegnący w kierunku zgodnym ze zwrotem osi X, a linia F_2 odpowiada fotonowi biegnącemu w kierunku przeciwnym. Oba fotony reprezentowane przez linie F_1 i F_2 przechodzą w chwili $t = 0$ przez punkt $x = 0$.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że styczne do linii świata cząstek materialnych w żadnym punkcie tych linii nie mogą mieć nachylenia do osi czasu większego (co do wartości bezwzględnej) niż linie świata fotonów.

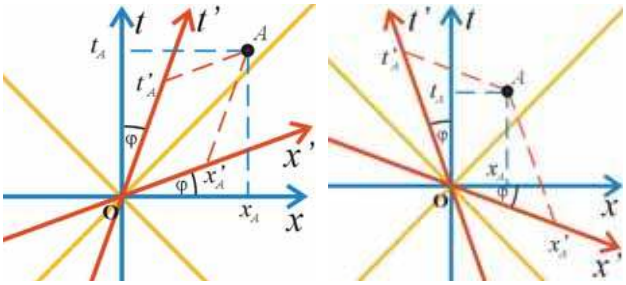
W poprzednim punkcie znaleźliśmy związek pomiędzy kątem obrotu hiperbolicznego ψ i prędkością $\tanh\psi = v$.



(a) (b)

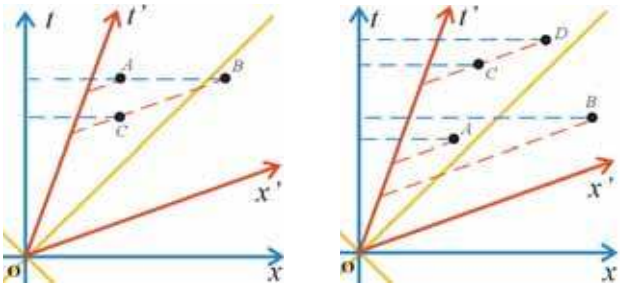
Rysunek 1. Diagram Minkowskiego – dwuwymiarowa część czasoprzestrzeni z osią czasową t mierzoną w jednostkach czasu (np. w sekundach) i osią przestrzenną x mierzoną w tych samych jednostkach co czas (np. w sekundach świetlnych ls). (a) Zdarzenie A i jego współrzędne. (b) A-D linie świata punktów materialnych oraz F1 i F2 linie świata fotonów.

eprasa.pl 6365cfbfa2



(a) (b)

Rysunek 2. Ruch jako obrót hiperboliczny w czasoprzestrzeni. Układ odniesienia reprezentowany przez czerwone osie porusza się względem układu reprezentowanego przez niebieskie osie wzdłuż osi X. Na rysunku (a) S' porusza się w kierunku zgodnym ze zwrotem osi X (tan(ϕ) = v ≈ 0,36). Na rysunku (b) S' porusza się w kierunku przeciwnym (tan(ϕ) = v ≈ -0,36). Na rysunkach pokazano również jak należy odczytywać współrzędne zdarzenia w obu układach.



(a) (b)

Rysunek 3. Kolejność zdarzeń obserwowanych z dwóch układów odniesienia – układu S (niebieskie osie) i układu S' (czerwone osie) poruszającego się względem S w kierunku zgodnym z osią X. (a) Względność równoczesności (b) Względność kolejności zdarzeń.

Skojarzmy z kątem hiperbolicznym ψ kąt φ taki, że $\tan\varphi = \tanh\psi$ [9]. A zatem $\tan\varphi = v$.

Kąt φ jest kątem nachylenia osi obu układów. Ponieważ prędkość światła w próżni jest jednakowa dla wszystkich układów inercjalnych, to linie świata fotonów przechodzących przez początki każdego z tych układów są wspólne. A zatem osie układu S' musimy obrócić względem osi układu S w taki sposób, aby linie świata tych fotonów były symetralnymi kątów między osią przestrzenną i czasową każdego z układów. Czym większa jest prędkość układu S', tym bardziej osie tego układu będą zbliżone do linii świata fotonu poruszającego się w tym samym kierunku co układ S'. Na rysunku 2 (a) pokazano osie obu układów w sytuacji, gdy układ S' porusza się w kierunku zgodnym z osią X układu S z prędkością $v \approx 0{,}36$. Na rysunku 2 (b) układ S' porusza się w kierunku przeciwnym do zwrotu osi X z prędkością $v \approx -0{,}36$. Na obu rysunkach pokazano również w jaki sposób odczytujemy współrzędne zdarzenia w obu układach.

Względności równoczesności i względność kolejności zdarzeń

W kolejnych częściach artykułu zwracałem uwagę na to, jak ważne w zrozumieniu szczególnej teorii względności jest „pogodzenie" się z faktem, że równoczesność ma charakter względny. Dwa zdarzenia równoczesne dla jednych obserwatorów, a zachodzące w punktach o różnych współrzędnych na osi X nie są równoczesne dla obserwatorów poruszających się wzdłuż osi X. Na diagramach Minkowskiego względność równoczesności jest widoczna natychmiast. Przyjrzyjmy się rysunkowi 3 (a). Na rysunku tym widzimy trzy zdarzenia. Zdarzenia *A* i *B* są równoczesne dla obserwatorów z układu S, a nie są równoczesne dla obserwatorów z S'. Z kolei zdarzenia *C* i *B* są równoczesne w układzie S', a nie są równoczesne w układzie S.

W części [4] cyklu opisałem również możliwość względności kolejności zdarzeń. Jeśli spełnione są odpowiednie warunki, to kolejność, w jakiej obserwowane są dwa zdarzenia może zależeć od prędkości obserwatorów. Taką sytuację pokazuje rysunek 3 (b). W układzie S zdarzenie *A* poprzedza zdarzenie *B*, zaś w układzie S' jest odwrotnie – zdarzenie *B* poprzedza zdarzenie *A*. Dla zdarzeń *C* i *D* w układzie S obserwujemy kolejność *C*-*D*, a w układzie S' oba zdarzenia są równoczesne.

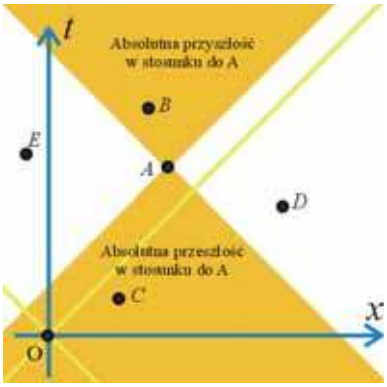
Aby możliwa była zmiana kolejności zaobserwowania zdarzeń przez obserwatorów poruszających się z odpowiednią prędkością odległość przestrzenna między punktami zajścia tych zdarzeń musi być większa niż odległość, jaką światło może pokonać w odstępie czasu pomiędzy tymi zdarzeniami. Jeśli ta odległość jest mniejsza niż droga, jaką może w tym czasie pokonać światło, to dla wszystkich obserwatorów, niezależnie od ich prędkości, kolejność zdarzeń będzie taka sama. Na diagramach Minkowskiego możemy łatwo wyznaczyć obszary czasoprzestrzeni spełniające opisane powyżej warunki. Wystarczy przeprowadzić linie świata fotonów przechodzących przez dane zdarzenie. Powstaną wówczas tzw. stożki świetlne (patrz rysunek 4). W dolnym stożku danego zdarzenia mieszczą się zdarzenia, które dla wszystkich obserwatorów będą wcześniejsze od zdarzenia znajdującego się na wierzchołku stożka. Ten obszar nazywamy obszarem *absolutnej przeszłości* tego zdarzenia. Tak jest np. ze zdarzeniami *O* i *C* w stosunku do zdarzenia *A* na rysunku 4. Jeżeli jakieś zdarzenie jest przyczyną innego zdarzenia, to musi się ono znajdować w dolnym stożku świetlnym tego zdarzenia (w obszarze jego absolutnej przeszłości). Z kolei w górnym stożku świetlnym danego zdarzenia mieszczą się zdarzenia, które dla wszystkich obserwatorów będą późniejsze od tego zdarzenia. Ten obszar nazywamy obszarem *absolutnej przyszłości* zdarzenia. Tak jest w przypadku zdarzenia *B* w stosunku do zdarzenia *A* lub w przypadku zdarzeń *A, B, E* w stosunku do zdarzenia O na rysunku 4. Jeżeli jakieś zdarzenie jest konsekwencją innego zdarzenia, to musi się ono znajdować w górnym stożku świetlnym tego zdarzenia (w obszarze jego absolutnej przyszłości).

Kolejność danego zdarzenia i dowolnego innego zdarzenia leżącego poza jego stożkami świetlnymi może być dowolna i będzie zależała od prędkości, z jaką poruszają się obserwatorzy. Tak jest między innymi w przypadku zdarzeń *O* i *C*, *O* i *D* lub *A* i *E*, *A* i *D* na rysunku 4. Zwróćmy uwagę na to, że z faktu, że prędkość światła w próżni jest graniczną prędkością przesyłania energii i informacji wynika, że pomiędzy danym zdarzeniem, a zdarzeniami leżącymi poza jego stożkami świetlnymi nie może być związku przyczynowo skutkowego. Dlatego względność kolejności zdarzeń nie łamie związków przyczynowo skutkowych [4].

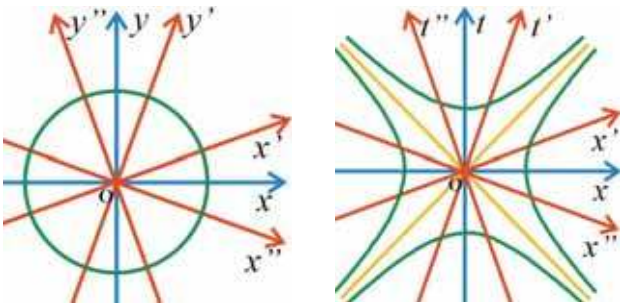
Odległość w czasoprzestrzeni

Opisywałem wcześniej, w jaki sposób trzeba obracać osie układu S' względem osi układu S. Należy jednak

eprasa.pl 6365cfbfa2



Rysunek 4. Stożki świetlne absolutnej przeszłości i absolutnej przyszłości zdarzenia A.



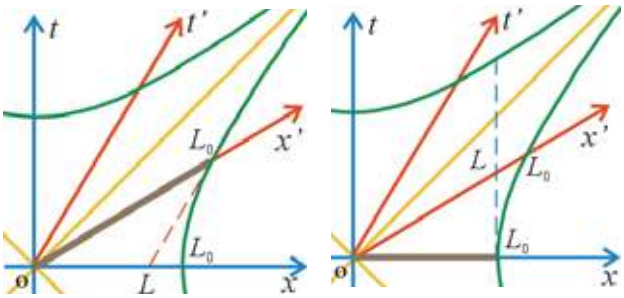
(a) (b)

Rysunek 5. Okrąg w przestrzeni euklidesowej (a) i w czasoprzestrzeni (b). W obu przypadkach zielone linie są zbiorem punktów równoodległych od punktu O.

zwrócić uwagę na jeszcze jeden aspekt tej operacji. Jeśli narysujemy osie obu układów a następnie narysujemy zbiór punktów odległych od wspólnego początku układów o 1, to przecięcie tej krzywej z osiami układów wyznaczy jednostkowe długości tych osi. W przypadku zwykłej przestrzeni euklidesowej krzywą tą będzie krzywa o równaniu $x^2 + y^2 = 1$, czyli okrąg o środku w początku układów i promieniu jednostkowym. Taką sytuację pokazuje rysunek 5 (a). W przypadku czasoprzestrzeni, ze względu na jej metrykę, krzywą opisującą zbiór punktów równoodległych od początku układu (zdarzenia O w punkcie $x = 0$ w chwili $t = 0$) jest krzywa $t^2 - x^2 = \pm 1$. Zbiorem punktów reprezentujących to równanie są cztery hiperbole pokazane na rysunku 5 (b). Jak widzimy odcinki jednostkowe na osiach układu S' będą dłuższe niż odcinki jednostkowe na osiach układu S. Długość tych pierwszych dąży do nieskończoności w miarę jak prędkość układu zbliża się do prędkości światła. Różnica długości odcinków jednostkowych w układach S i S' będzie skutkowała zjawiskami kontrakcji długości i dylatacji czasu.

Kontrakcja długości i jej względność

Na rysunku 6 (a) brązowy odcinek reprezentuje pręt o długości spoczynkowej L_0 spoczywający w układzie S'. Rysunek przedstawia położenie pręta w czasoprzestrzeni w chwili $t' = 0$. Czerwona przerywana linia reprezentuje linię świata prawego końca pręta. Lewy koniec pręta znajduje się w początku układu S', więc linią świata tego końca jest oś czasu układu S'. Na rysunku widzimy, że w chwili $t = 0$ układu S lewy koniec pręta znajduje się w początku układu S, a prawy na przecięciu linii świata prawego końca pręta z osią X układu S. Punkt przecięcia



(a) (b)

Rysunek 6. Kontrakcja długości i jej względność. Układ S' (czerwone osie) porusza się względem układu S (niebieskie osie) z szybkością v = 0,6.

znajduje się w odległości L od punktu O i taki będzie wynik pomiaru długości pręta wykonany przez obserwatorów z S. Zielone krzywe na rysunku są zbiorem punktów w czasoprzestrzeni oddalonych od O na odległość L_0. Jak widzimy $L < L_0$. Zjawisko to nazywamy *kontrakcją długości*. Ale zauważmy, że zjawisko to jest symetryczne. Jeśli obserwatorzy z układu S' zmierzą długość pręta spoczywającego w S, którego długość w układzie S wynosi L_0, to również stwierdzą, że jest on krótszy niż L_0. Sytuację tę pokazuje rysunek 6 (b).

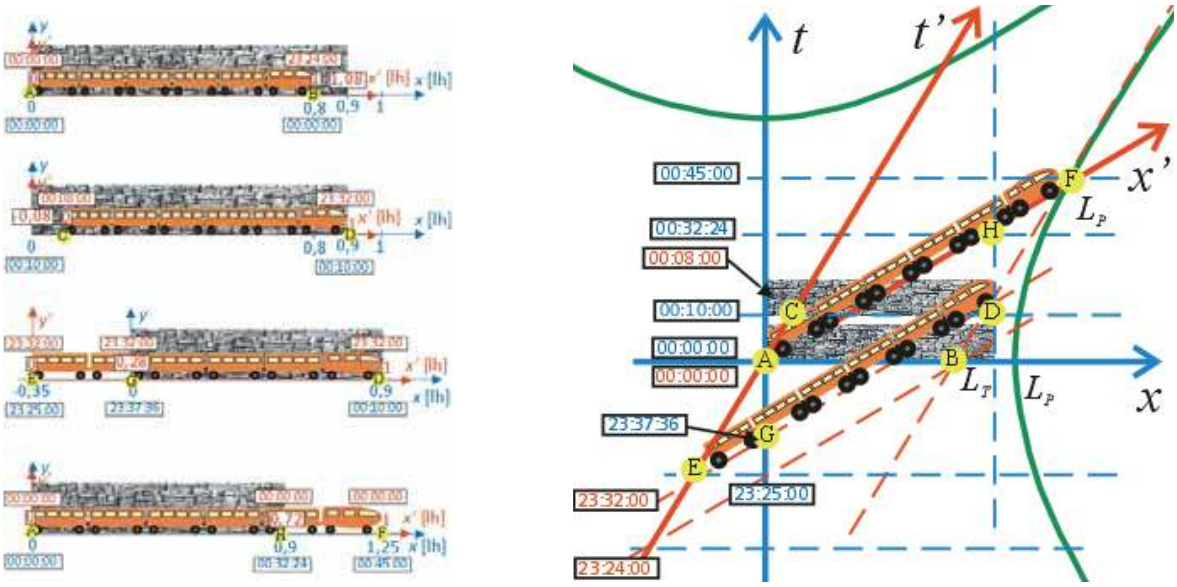
Paradoks pociągu i tunelu

W części [2] cyklu opisałem paradoks pociągu i tunelu. Jeśli prędkość pociągu o długości spoczynkowej L_P większej od długości tunelu L_T będzie odpowiednio duża, to wskutek kontrakcji długości, obserwatorzy związani z tunelem, nie będą przez pewien czas widzieć pociągu przejeżdżającego przez tunel. Paradoks polega na tym, że dla pasażerów pociągu tunel porusza się względem nich i to on ulegnie skróceniu. A zatem pasażerowie pociągu nie odnotują ani jednego momentu, w którym początek i koniec pociągu będą całkowicie schowane w tunelu. Na rysunku 7 (a) powtórzyłem rysunki z [2]. Dwa górne przedstawiają sytuacje widziane w układzie tunelu w chwilach 00:00:00 i 00:10:00 tego układu. Dwa dolne pokazują sytuacje widziane w układzie pociągu w chwilach 23:32:00 i 00:00:00 układu S'. Te same sytuacje przedstawiono na diagramie Minkowskiego na rysunku 7 (b). Widzimy, że rzeczywiście w układzie tunelu zdarzenia A i B oraz C i D są równoczesne. Zdarzenia A i B mają miejsce w chwili 00:00:00, a zdarzenia C i D w chwili 00:10:00. Natomiast w układzie pociągu w chwili 23:32:00 zachodzą jednocześnie zdarzenia E, G i D, a w chwili 00:00:00 zdarzenia A, H i F.

Dylatacja czasu i jej względność

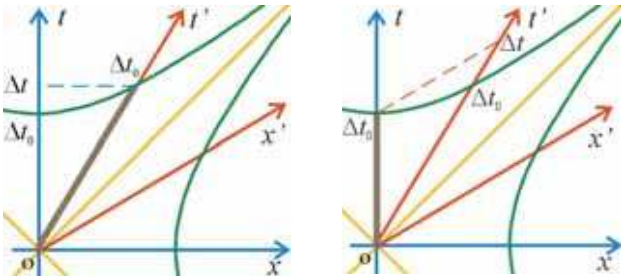
Na rysunku 8 (a) brązowy odcinek reprezentuje czas trwania jakiegoś zjawiska zachodzącego w początku układu S'. Zjawisko rozpoczyna się w chwili $t' = 0$ i trwa w tym układzie Δt_0. W układzie S zjawisko również rozpoczyna się w chwili $t = 0$ i kończy się w chwili Δt. Na rysunku widzimy hiperbole reprezentujące zbiór punktów oddalonych od początku układu o Δt_0. Zauważmy, że $\Delta t > \Delta t_0$, czyli w układzie S' czas biegnie wolniej niż w S. Jest to zjawisko nazywane *dylatacją czasu*. Ale podobnie jak kontrakcja długości również zjawisko dylatacji czasu jest

eprasa.pl 6365cfbfa2



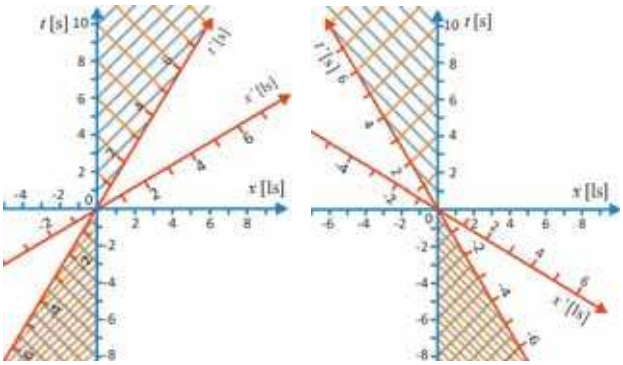
(a) (b)

Rysunek 7. Paradoks pociągu i tunelu. Pociąg o długości spoczynkowej LP = 1 lh porusza się z prędkością v = 0,6 względem tunelu o długości LT = 0,9 l. Dla obserwatorów związanych z tunelem od godziny 00:00:00 do godziny 00:10:00 pociąg jest całkowicie schowany w tunelu (dwa górne rysunki (a)). Dla pasażerów pociągu pociąg nigdy nie znajduje się w całości w tunelu (dwa dolne rysunki (a)). Rysunek (b) przedstawia te same sytuacje na diagramie Minkowskiego



(a) (b)

Rysunek 8. Dylatacja czasu i jej względność. Układ S' (czerwone osie) porusza się względem układu S (niebieskie osie) z szybkością v = 0,6. (a) Długość odcinka czasowego (brązowy odcinek) równego Δt_0 w układzie S' zmierzona w układzie S wynosi Δt i jest większa od Δt_0. (b) Ale jednocześnie długość odcinka czasowego (brązowy odcinek) równego Δt_0 w układzie S zmierzona w układzie S' wynosi Δt i jest większa od Δt_0.



(a) (b)

Rysunek 9. Układ S' (czerwone osie) porusza się względem układu S (niebieskie osie) z prędkością v = 0,6 (a) i v = -0,6 (b). Z punktu x = 0 wysyłane są co jedną sekundę impulsy radiowe (szaroniebieskie linie). Podobnie z punktu x' = 0 co jedną sekundę (mierzoną w układzie S') wysyłane są impulsy radiowe (pomarańczowe linie). Gdy zegary zbliżają się do siebie (a) obserwatorzy przy obu zegarach odbierają sygnały co pół sekundy. Gdy zegary oddalają się od siebie (b) impulsy odbierane są co dwie sekundy.

w pełni symetryczne. Na rysunku 8 (b) widzimy, że zjawisko trwające Δt_0 w układzie S dla obserwatorów z S' będzie trwało $\Delta t > \Delta t_0$, czyli dla nich czas w układzie S biegnie wolniej niż w ich układzie.

W części [5] cyklu rozważałem zegary wysyłające w regularnych odstępach czasu impulsy radiowe. Na rysunku 9 szaroniebieskie linie reprezentują linie świata fotonów emitowanych przez zegar umieszczony punkcie $x = 0$ układu S, a linie pomarańczowe reprezentują linie świata fotonów wysyłanych przez zegar umieszczony w punkcie $x' = 0$ układu S'. W obu układach sygnały wysyłane są co jedną sekundę. Na rysunku 9 (a) zegar w S' porusza się względem zegara w S z prędkością $v = 0{,}6$, a na rysunku 9 (b) z prędkością $v = -0{,}6$.

Obserwatorzy związani z danym zegarem (niezależnie od tego, o który z tych dwóch zegarów chodzi) będą odbierać sygnały z drugiego zegara co pół sekundy, gdy zegary zbliżają się do siebie, oraz co dwie sekundy, gdy zegary oddalają się. Na odstęp czasu pomiędzy dwoma kolejnymi odebranymi sygnałami składa się odstęp czasu pomiędzy kolejnymi wysyłanymi sygnałami i zwiększający się lub zmniejszający czas potrzebny na dotarcie sygnału do obserwatora związany ze zwiększającą się lub zmniejszającą odległością między zegarami

$$t_{k+1} - t_k = \Delta t \pm v\Delta t.$$

Stąd możemy policzyć, że odstęp czasu pomiędzy kolejnymi sygnałami wysyłanymi przez drugi z zegarów, ale mierzony we własnym układzie jest dłuższy niż odstęp czasu między sygnałami wysyłanymi przez nas. I będzie tak niezależnie od tego, z którym zegarem jesteśmy związani. W rozważanym przykładzie wyniesie on 1,25 s (2 s/(1+0,6) = 1,25 s, 0,5 s/(1-0,6) = 1,25 s).

Paradoks bliźniąt

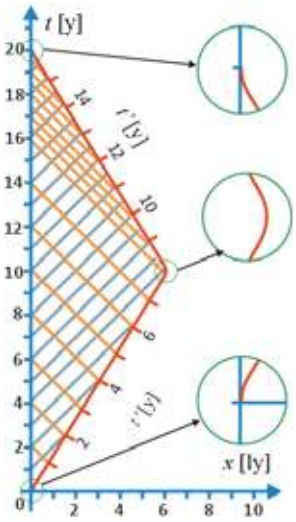
W części [5] omawiałem najbardziej znany paradoks szczególnej teorii względności – paradoks bliźniąt. Zwykle opisując paradoks bliźniąt zakłada się, że osiąganie

eprasa.pl 6365cfbfa2

przez pojazd kosmiczny docelowej prędkości oraz hamowanie odbywa się natychmiastowo. My załóżmy, że odbywa się to bardzo szybko w porównaniu z trwaniem całego lotu, ale stopniowo. Linia świata pojazdu kosmicznego może w takim przypadku wyglądać tak, jak na rysunku 10 (czerwona linia). W czasie ruchu przyśpieszonego linie świata są odpowiednimi krzywymi (patrz powiększenia w kółeczkach po prawej stronie rysunku 10), a chwilowe osie czasu są do nich styczne w każdym momencie. Obaj bliźniacy wysyłają co rok sygnał. Jak widzimy podczas lotu bliźniaka-kosmonauty z szybkością docelową $v = 0{,}6$ do gwiazdy odległej od Ziemi o 6 lat świetlnych (6 ly) bliźniak na Ziemi zdąży wysłać 20 sygnałów, a bliźniak-kosmonauta wyśle tylko 16 sygnałów (ostatnie sygnały obaj wyślą w momencie lądowania pojazdu na Ziemi). Bliźniak kosmonauta odbierze 20 sygnałów – 4 co dwa lata podczas oddalania się od Ziemi i 16 co pół roku podczas powrotu na Ziemię, co daje $4\times2 + 16\times0{,}5 = 16$ lat. Bliźniak na Ziemi odbierze 16 sygnałów – 8 co dwa lata podczas lotu rakiety do gwiazdy i 8 co pół roku podczas powrotu rakiety, co daje $8\times2 + 8\times0{,}5 = 20$ lat. Wielu autorów kończy na takim opisie wyjaśnianie paradoksu bliźniąt, ale takie wyjaśnienie jest niekompletne. Przecież w świetle tego co opisywałem w poprzednim punkcie według bliźniaka na Ziemi jego brat zestarzeje się o 20 lat/1,25 = 16 lat, a z punktu widzenia bliźniaka-kosmonauty jego brat na Ziemi zestarzeje się o 16 lat/1,25 = 12,8 lat. Dostajemy zatem sprzeczne wyniki. Przecież nie może być tak, że ostatecznie po spotkaniu obu braci dla bliźniaka, który został na Ziemi jego brat jest o 4 lata młodszy od niego, a dla bliźniaka-kosmonauty jest odwrotnie, młodszy jest jego brat (o 3,2 lat). Do takiej sprzeczności prowadzi nas błędne założenie, że sytuacja obu bliźniaków jest symetryczna w czasie całego trwania lotu. A to nie jest prawdą.

Symetria występuje jedynie wówczas, gdy pojazd kosmiczny porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym. Ale w etapach lotu, w których pojazd kosmiczny zmienia swoją prędkość nie ma symetrii. Przyśpieszenie z jakim porusza się wówczas pojazd kosmiczny odczuwa jedynie bliźniak kosmonauta i jak pisałem w części [5] w tych etapach lotu jedynie w układzie pojazdu kosmicznego dzieją się „dziwne" rzeczy. I chociaż te etapy lotu są krótkie w porównaniu z całym lotem, to właśnie one usuwają sprzeczność, jaką dostaliśmy powyżej.

Po pierwsze podczas wzrostu prędkości narasta zjawisko kontrakcji długości. W układzie pojazdu gwiazda gwałtownie „przybliża się" do pojazdu. Przypominam [5], że nie chodzi tu malenie odległości do gwiazdy wynikające z ruchu rakiety lecz ze zjawiskiem kontrakcji długości. Jeśli prędkość zmienia się bardzo szybko, np. prędkość docelową rakieta osiąga w ciągu kilku godzin (jak rozważałem w [5]) lub kilku miesięcy (jak pokazano na rysunku 10), to w porównaniu z efektem kontrakcji długości możemy zaniedbać zmianę odległości wynikającą z ruchu rakiety. Wówczas otrzymamy następujące wyniki: po osiągnięciu prędkości $v = 0{,}2$ odległość rakieta-gwiazda wyniesie około 6 ly/1,02 ≈ 5,9 ly, po osiągnięciu prędkości $v = 0{,}4$ około 6 ly/1,09 ≈ 5,5 ly, a po osiągnięciu docelowej prędkości $v = 0{,}6$ wyniesie już tylko około 6 ly/1,25 = 4,8 ly. Jeszcze raz podkreślam, że nie chodzi tu o zbliżanie się rakiety do gwiazdy wynikające z przemieszczania się rakiety w przestrzeni, gdyż to by oznaczało, że rakieta porusza się z prędkością nadświetlną! Efekt jest związany z hiperobrotem w czasoprzestrzeni.



Rysunek 10. Linia świata rakiety podczas lotu do gwiazdy odległej o 6 ly i powrotu na ziemię oraz linie świata sygnałów emitowanych co rok przez Ziemię (szaroniebieskie) i rakietę (pomarańczowe).

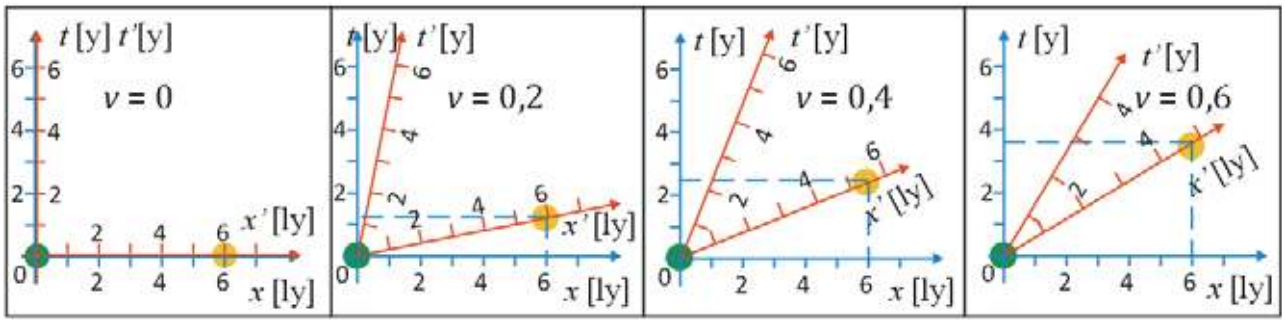
Po drugie podczas wzrostu prędkości w układzie pojazdu obserwujemy narastające zjawisko desynchronizacji zegarów na Ziemi i na gwieździe. Wskazanie zegara na Ziemi początkowo nie odbiega znacząco od zegara w pojeździe, gdyż jest on jeszcze stosunkowo blisko pojazdu, ale zegar na gwieździe gwałtownie przyśpieszy. Przy przyśpieszeniach rakiety, jakie tu rozważamy czas dochodzenia do prędkości docelowej można zaniedbać w porównaniu z desynchronizacją zegarów, podobnie jak zaniedbaliśmy przybliżanie się rakiety do gwiazdy w porównaniu z efektem kontrakcji długości na etapie przyśpieszania. I tak: tuż przed startem zegar na Ziemi, w pojeździe i na gwieździe pokazują czas 0, po osiągnięciu prędkości $v = 0{,}2$ zegar na gwieździe będzie wskazywał około 1,2 lat (1,2 y), po osiągnięciu prędkości $v = 0{,}4$ około 2,4 lat, a po osiągnięciu docelowej prędkości $v = 0{,}6$ około 3,6 lat.

Oba opisane zjawiska pokazują diagramy Minkowskiego na rysunku 11. Zielone kółeczko reprezentuje Ziemię, a pomarańczowe gwiazdę.

Po osiągnięciu prędkości docelowej następuje etap ruchu jednostajnego prostoliniowego. Obaj bliźniacy znajdują się wówczas w układach inercjalnych, czyli mamy pełną symetrię. Z punktu widzenia bliźniaka na Ziemi lot do gwiazdy trwa 10 lat, ale bliźniak kosmonauta zestarzeje się o 10 lat/1,25 = 8 lat. Z punktu widzenia kosmonauty lot do gwiazdy potrwa 4,8 ly/0,6 = 8 lat (przypominam, że wskutek kontrakcji długości odległość do gwiazdy zmalała do 4,8 ly; patrz rysunki 11 (d) i 12 (a)), ale jego brat na Ziemi zestarzeje się o 8 lat/1,25 = 6,4 lat. I obaj mają rację. Pokazuje to diagram Minkowskiego na rysunku 12 (a).

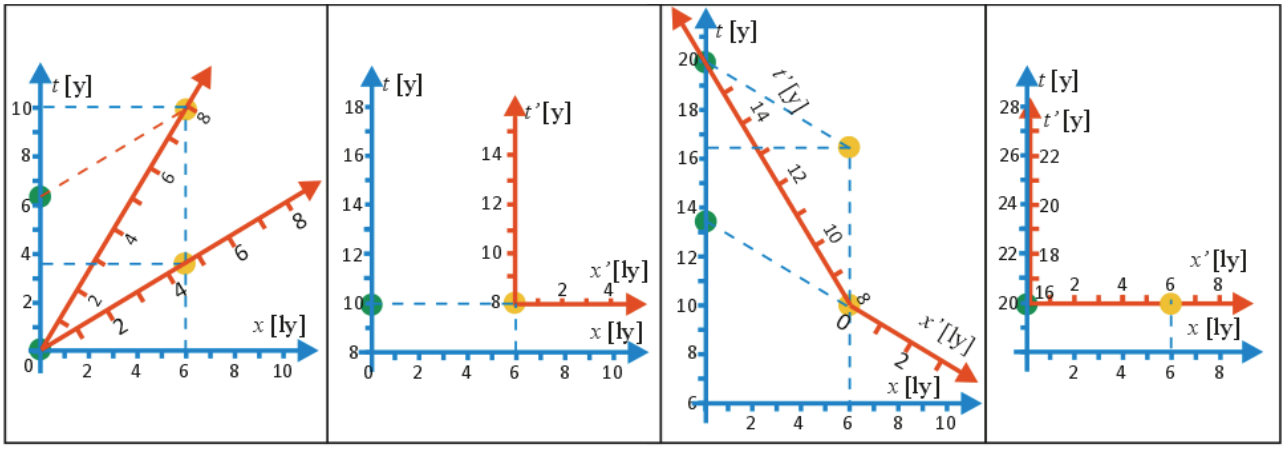
Teraz następuje etap szybkiego hamowania. Podczas spadku prędkości efekt kontrakcji długości będzie gwałtownie malał do zera i po wyhamowaniu Ziemia będzie znów w odległości 6 ly od gwiazdy (i pojazdu, który do niej doleciał). Do zera musi także zmaleć desynchronizacja zegarów. Tym razem to Ziemia jest w dużej odległości od pojazdu, czyli zegar na Ziemi gwałtownie przyśpieszy i po wyhamowaniu pojazdu przy gwieździe zegar na Ziemi będzie wskazywał to co zegar na gwieździe. A ten wskazuje teraz 10 lat (3,6 lat początkowej desynchronizacji + 6,4 lat, jakie w układzie kosmonauty upłynęły na Ziemi i na gwieździe podczas lotu rakiety). Oznacza to, że w ciągu krótkiego czasu hamowania rakiety zegar na Ziemi „nadgoni" 3,6 lat. Ta sytuacja przedstawiona jest na rysunkach 12 (a) i (b).

eprasa.pl 6365cfbfa2



(a) (b) (c) (d)

Rysunek 11. Narastająca wraz z prędkością podczas startu rakiety kontrakcja odległości gwiazdy (pomarańczowe kółeczko) od pojazdu oraz desynchronizacja zegara na gwieździe w stosunku do zegara na Ziemi (zielone kółeczko)



(a) (b) (c) (d)

Rysunek 12. Efekty przestrzenne i czasowe występujące w kluczowych momentach lotu rakiety.

Te same zjawiska wystąpią podczas powrotu rakiety. Z tym, że teraz podczas dochodzenia rakiety do docelowej prędkości gwałtownie przyśpieszy zegar na Ziemi. I po osiągnięciu przez pojazd prędkości docelowej v = -0,6 zegar na Ziemi będzie już wskazywał 13,6 lat (patrz rysunek 12 (c)). Zwróćmy uwagę, że w ciągu stosunkowo krótkich etapów lotu: hamowania przy gwieździe, a następnie przyśpieszania w drodze powrotnej, na Ziemi upłynie aż 3,6 lat + 3,6 lat = 7,2 lat i zegar na Ziemi będzie wskazywać 13,6 lat. Tymczasem zegar na gwieździe wskazuje 10 lat, a zegar w pojeździe 8 lat (patrz rysunek 12 (c)).

W układzie kosmonauty lot powrotny zajmie 8 lat, ale według kosmonauty bliźniak na Ziemi zestarzeje się w tym czasie o 8 lat/1,25 = 6,4 lat. Wobec tego tuż przed lądowaniem pojazdu zegar na Ziemi będzie wskazywać czas 13,6 lat + 6,4 lat = 20 lat, a zegar w pojeździe 16 lat. Zegar na gwieździe będzie spóźniał się w stosunku do zegara na Ziemi o 3,6 roku (patrz rysunek 12 (c)), ale w czasie hamowania „nadgoni" ten czas i ostatecznie po wylądowaniu rakiety zegary na Ziemi i na gwieździe pokażą czas 20 lat (10 lat + 6,4 lat + 3,6 lat), podczas gdy zegar w rakiecie wskaże czas 16 lat (patrz rysunek 12 (d)).

Ostatecznie po powrocie bliźniak kosmonauta będzie o 4 lata młodszy od bliźniaka, który pozostał na Ziemi.

Tym artykułem kończę cykl poświęcony kinematyce relatywistycznej.

Od powstania szczególnej teorii względności minęło ponad sto lat, a mimo tego wiedza na jej temat jest bardzo mała. Niewiele osób wierzy w realność własności czasu i przestrzeni wynikające z tej teorii, chociaż były one już na wiele sposobów sprawdzone doświadczalnie. Namacalnym dowodem na słuszność tej teorii jest coś z czego korzysta bardzo wiele osób na świecie – systemy nawigacji typu GPS, które do poprawnego działania muszą uwzględniać własności czasoprzestrzeni opisane przez szczególną i ogólną teorię względności [10]. Teoria Einsteina uważana jest za zbyt skomplikowaną. Jednak trudność w zrozumieniu tej teorii nie tkwi, co mam nadzieję pokazałem, w skomplikowanym aparacie matematycznym, lecz w konieczności przełamania schematyzmu myślenia. To sprawia, że studiowanie szczególnej teorii względności wyjątkowo poszerza horyzonty myślowe. Dlatego uważam, że warto przekazywać tę wiedzę uczniom.

Jan Kurzyk
Instytut Fizyki Politechniki Krakowskiej

LITERATURA

[1] J. Kurzyk, *Paradoksy szczególnej teorii względności. Część I*. Fizyka w Szkole nr 1/2019.
[2] J. Kurzyk, *Paradoksy szczególnej teorii względności. Część II*. Fizyka w Szkole nr 2/2019.
[3] J. Kurzyk, *Paradoksy szczególnej teorii względności. Część III*. Fizyka w Szkole nr 3/2019.
[4] J. Kurzyk, *Paradoksy szczególnej teorii względności. Część IV*. Fizyka w Szkole nr 4/2019.
[5] J. Kurzyk, *Paradoksy szczególnej teorii względności. Część V*. Fizyka w Szkole nr 5/2019.
[6] https://pl.wikipedia.org/wiki/Hermann_Minkowski [Dostęp 07.05.2019].
[7] https://pl.wikipedia.org/wiki/Funkcje_hiperboliczne [Dostęp 07.05.2019].
[8] L.D.Landau, E.M.Lifszyc, *Teoria pola*, PWN 1972.
[9] A. Dragan, *Niezwykle szczególna teoria względności*, http://www.fuw.edu.pl/~dragan/Fizyka/Nstw.pdf [Dostęp 07.05.2019].
[10] J. Kurzyk, *Dlaczego działa GPS?* Fizyka w Szkole nr 2/2017.

eprasa.pl 6365cfbfa2

Życie bez grawitacji

Arleta **Biegańska**

Grawitacja (ciążenie powszechne) – jedno z czterech oddziaływań podstawowych, będące zjawiskiem naturalnym polegającym na tym, że wszystkie obiekty posiadające masę oddziałują na siebie, wzajemnie przyciągając się.[1]

Trudno się nie zgodzić z faktem, że zjawisko grawitacji w znaczący sposób wpływa na ziemskie życie. Wbrew temu, w podstawie programowej kształcenia ogólnego dla szkoły podstawowej, niewiele uwagi poświęca się temu zjawisku[2].

Zjawisko grawitacji w podstawie programowej

Analizując podstawę programową II etapu edukacyjnego w zakresie fizyki znajdziemy kilka zapisów powiązanych z grawitacją. W części „Treści nauczania – wymagania szczegółowe" w rozdziale II *Ruch i siły* są to „pkt 11) rozpoznaje i nazywa siły, podaje ich przykłady w różnych sytuacjach praktycznych (siły: ciężkości...); pkt 16) opisuje spadek swobodny (...); pkt 17) posługuje się pojęciem siły ciężkości; stosuje do obliczeń związek między siłą, masą i przyspieszeniem grawitacyjnym;" oraz w rozdziale III *Energia* pkt 3 „posługuje się pojęciem energii potencjalnej grawitacji (…)".

Jeśli rozszerzymy zakres analizy to w podstawie programowej dla I etapu edukacyjnego: klasy I-III w celach kształcenia – wymagania ogólne dotyczących poznawczego obszaru rozwoju znajdziemy pkt IV ppkt 8) „umiejętność obserwacji faktów, zjawisk przyrodniczych (...) wykonywania eksperymentowania i doświadczeń, a także umiejętność formułowania wniosków i spostrzeżeń". Natomiast w treściach nauczania – wymagania szczegółowe w punkcie IV. *Edukacja przyrodnicza* ppkt 6) „planuje, wykonuje proste obserwacje, doświadczenia i eksperymenty dotyczące obiektów i zjawisk przyrodniczych, tworzy notatki z obserwacji, wyjaśnia istotę obserwowanych zjawisk według procesu przyczynowo- skutkowego i czasowego".

Realizując podstawę programową dla I etapu edukacyjnego można więc uwzględnić powszechne ciążenie. Znalazłam scenariusze lekcji realizowanych w klasach I-III szkoły podstawowej nawiązujących do zjawiska grawitacji np. scenariusz Przemysława Michalskiego „Dlaczego jabłko spada"[3].

Eksperymenty niemowlaka

Może nie ma potrzeby poświęcania zbyt wielkiej uwagi zjawisku grawitacji. Przecież każde dziecko zanim trafiło do szkoły zbadało to zjawisko samodzielnie.

Każdy niemowlak, który opanuje już sztukę siedzenia samodzielnie bada spadanie ciał. To pierwszy samodzielnie wykonany eksperyment dziecka. Kto miał kontakt z półrocznym niemowlakiem musiał być świadkiem lub uczestnikiem sytuacji, w której dziecko uparcie upuszcza podawane mu przedmioty: zabawki, smoczek, łyżeczkę itp. Nie ma co się niecierpliwić. To nie ma nic wspólnego z nieposłuszeństwem czy złośliwością malucha. Dziecko bada doświadczalnie spadanie ciał. Kiedy nabierze przekonania, że każde ciało pozbawione podparcia lub zawieszenia spada poszuka sobie innych obszarów doświadczania świata. Po co więc wracać do tego zagadnienia po wielu latach w szkole na lekcjach fizyki?

W szkole podstawowej uczeń nie jest gotowy do teoretycznego opisu tego zjawiska. Nie wprowadzamy prawa powszechnego ciążenia. Chociaż trudno nie wspomnieć o tym, że ciążenie jest zjawiskiem powszechnym. Jak przy tak

[1] Wikipedia

[2] Załącznik nr 2 do rozporządzenia MEN z dn. 14.02.2017 r. w sprawie podstawy programowej wychowania przedszkolnego oraz podstawy programowej kształcenia ogólnego dla szkoły podstawowej (....) – Dz. U. poz. 356 oraz z 2018 r. poz. 1679

[3] www.scenariuszelekcji.edu.pl/scenariusz/dlaczego-jablko-spada

eprasa.pl 6365cfbfa2

skromnej siatce godzin w interesujący sposób zwrócić uwagę uczniów na tak istotne zjawisko? Opowiedzieć anegdotę o Newtonie i jabłku?

Życie bez grawitacji

Proponuję odwrócić sytuację i zacząć od postawienia problemu „Jak by wyglądało życie na Ziemi, gdyby nie było zjawiska grawitacji?

W maju 2018 r. zrobiło się głośno na temat przelotu Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS) nad Polską. Media podawały czasy i lokalizację widocznych przelotów Stacji. Stacja jest wdzięcznym obiektem do obserwacji. Ja również zachęcałam swoich uczniów do obserwacji przelotów ISS. Szukając informacji na temat ISS znalazłam kilka filmów o życiu na stacji. Najbardziej podobała mi się relacja amerykańskiej astronautki Sunity Williams[4].

Film oglądałam wielokrotnie nie tylko z uczniami, ale również z zaprzyjaźnionymi przedszkolakami. Przedszkolakom film bardzo się spodobał. Na lekcjach film stał się pretekstem do dyskusji na temat wpływu zjawiska grawitacji na codzienne życie na Ziemi. Podglądając codzienne życie mieszkańców stacji kosmicznej uczniowie uświadamiają sobie wpływ przyciągania ziemskiego na sposób poruszania się, na przebieg wielu zjawisk. Włosy astronautki nie opadają w dół, podobnie jak zawieszony na szyi wisiorek.

Na filmie można zaobserwować działanie sił spójności, które powodują, że kropelki wody są idealnie okrągłe. Na Ziemi krople deszczu spadają w dół i mają kształt „łezki". W warunkach braku ciążenia codzienne czynności np. mycie zębów, picie, chodzenie sprawiają trudności i wymagają specjalnych sprzętów, wyrobienia sobie innych nawyków.

Czy idąc spać trzeba się położyć? Przecież żadna siła nie ciągnie nas w dół. Jak nalać kawy do kubka i jak się napić? Dlaczego astronauci nie chodzą tylko „pływają" w powietrzu? Skoro nie ma siły grawitacji nie ma siły nacisku na podłoże, nie ma więc tarcia. Chodzenie jest niemożliwe. Nie można niczego swobodnie położyć na stole, a każdy sprzęt musi być mocowany np. za pomocą specjalnych taśm lub uchwytów. Dlaczego astronauci podczas pobytu na Stacji muszą regularnie ćwiczyć? Czy zwykłe ćwiczenia z hantlami przyniosą spodziewany efekt?

Przy okazji warto postawić pytanie np. czy przyciąganie jest wszędzie takie samo? Warto zwrócić uwagę uczniów na sposób poruszania się astronautów po powierzchni Księżyca.

Filmy relacjonujące życie na stacji kosmicznej czy lądowanie na Księżycu znajdziemy w zasobach Internetu. Filmy te uświadamiają uczniom jak ważnym w życiu codziennym jest zjawisko grawitacji. Zjawisko to jest tak powszechne, że na co dzień go po prostu nie zauważamy. Dopiero odwrócenie sytuacji powoduje, że doceniamy jego znaczenie.

Bardzo często przy realizacji innych działów fizyki odwołuję się do filmu. Na przykład omawiając zagadnienia: zjawisko tarcia, bezwładność ciał, działanie sił międzycząsteczkowych. Informacje o sposobach zasilania za pomocą baterii słonecznych podaję jako przykład źródeł prądu elektrycznego. „Podglądanie" życia astronautów pozwala na korelację międzyprzedmiotową.

Warto zachęcać uczniów do oglądania relacji innych astronautów, w tym w różnych wersjach językowych, które łatwo znaleźć w zasobach Internetu. Oprócz poszerzania swojej wiedzy z zakresu fizyki doskonalą praktyczne posługiwanie się językiem np. angielskim. Ja przypominam sobie język rosyjski oglądając relację rosyjskich astronautów.

Warto zauważyć, że choć uczniowie obecnie w szkole podstawowej nie uczą się astronomii, to jednak bardzo się interesują astronomią i mają elementarną o niej wiedzę. Na lekcjach geografii poznają położenie Ziemi w kosmosie (Geografia, Treści nauczania – wymagania szczegółowe rozdz. V Ruchy Ziemi. Ziemia w Układzie Słonecznym).

Awaria na Stacji

O Stacji zrobiło się znowu głośno w środę 29 sierpnia 2018 r., gdy odkryto w niej maleńką dziurę powodującą niewielki, ale stały spadek ciśnienia. Na szczęście dziurę zatkano. Analiza przyczyn i ewentualnych skutków awarii pozwala na powtarzanie i utrwalanie wiedzy. Śledzenie losów wysyłanych z Ziemi obiektów, poznawanie przyczyn katastrof jest dobrym sposobem na zainteresowanie fizyką. Uczniowie uświadamiają sobie jak szerokie jest wykorzystanie fizyki w praktyce.

Lotom kosmicznym często towarzyszą dramatyczne sytuacje, prawie takie jak w filmach. Wielu uczniów interesuje się literaturą, filmami i grami komputerowymi z zakresu science fiction, w tym space opera. To zainteresowanie sprzyja zwiększeniu motywacji do uczenia się fizyki i poznawania podstaw astronomii.

Stację znowu dość dobrze można obserwować. do czego gorąco zachęcam. Aktualne terminy widocznych w Polsce przelotów Stacji, w tym dane o jej jasności znajdziemy m.in. na stronie https://www.astronomia24.com Niestety uczniowie szkoły podstawowej nie są w ogóle przygotowywani do obserwacji astronomicznych. Wprowadzać ich w arkana astronomii możemy jedynie na zajęciach pozalekcyjnych czy pozaszkolnych. No cóż „i tylko astronomii żal".

Kilka uwag o języku

Słownik PWN pojęcia ciążenie, grawitacja, przyciąganie określa jako synonimy. W podstawie programowej nie używa się terminu „grawitacja", z wyjątkiem pojęć „przyspieszenie grawitacyjne" i „energia potencjalna grawitacji". Ponieważ w podstawie programowej wśród zadań szkoły w zakresie fizyki zapisano w pkt 4) „posługiwanie się pojęciami i językiem charakterystycznym dla fizyki" dlatego obok używanego w podstawie programowej sformułowania „ciężkości" warto stosować termin „grawitacja".

Arleta Biegańska
Kawęczyn

[4] https://www.youtube.com/watch?v=ntYP7cRozhk.

eprasa.pl 6365cfbfa2

„Celestia" miała kształt dysku. Zbudowana w latach 80 ubiegłego wieku przez Departament Wojen Kosmicznych w Waszyngtonie, krążyła początkowo wokół Ziemi jako sztuczny satelita i „ostatnia twierdza imperializmu", jednak nagle w roku 1994 odpaliła niespodziewanie silniki i skierowała się w kierunku Juventy, planety układu Proxima Centauri, nowej ziemi obiecanej, dodać trzeba, że obiecanej w dość niejasny i w sumie podejrzany sposób.

„Zagubiona przyszłość", czyli o realności sił pozornych

Tadeusz **Wibig**

Nie będziemy tu jednak zastanawiać się nad tym, co się już wydarzyło. Zainteresowanych odsyłamy do książki „Zagubiona przyszłość". Jej autorami są Krzysztof Boruń i Andrzej Trepka, dziennikarze, pionierzy (obok Stanisława Lema) polskiej powojennej literatury fantastyczno-naukowej, wybitni popularyzatorzy nauki, a przy okazji współzałożyciele Polskiego Towarzystwa Astronautycznego. W połowie ubiegłego wieku napisali pierwszy tom kosmicznej trylogii, którą mogli zaczytywać się nasi dziadkowie. Nie miejsce tu na streszczanie jej pasjonującej fabuły, interesować nas będą jedynie pewne fizyczne aspekty życia na Celestii, a w szczególności podskoki w pobliżu osi, bo oczywiste jest chyba, że Celestia musiała wirować.

Planowana podróż trwać miała mniej więcej 20 000 lat, a nikt rozumny nie pokusiłby się o próbę odgadnięcia, co przez tyle lat stać się może z organizmami pozostającymi cały czas w stanie nieważkości. Celestia poruszała się swobodnie wciąż z nadaną jej dawno temu liniową prędkością 50 km/s w kierunku gwiazdy α w gwiazdozbiorze Centaura. Gdyby nie obracała się, stanowiłaby świetny przykład układu inercjalnego, gdzie każde ciało, w tym i ciało każdego z 5000 mieszkańców Celestii, pozostawione w spoczynku, w tym spoczynku pozostawałoby, a jeśliby nadać mu jakąś prędkość niewielką, to poruszałoby się z nią aż do momentu zderzenia z jakimś innym ciałem, ścianą, sufitem, czy innym Celestianinem.

Celestię zbudowano jako coś w rodzaju arki i wyposażono ją i pomyślano najlepiej, jak się dało. Spróbowano więc także odtworzyć w niej namiastkę grawitacji: Celestia obracała się. Oś obrotu przebiegała oczywiście prostopadle do płaszczyzny dysku.

Oddajmy głos Autorom:

„...Celestia jest jakby olbrzymią, płaską puszką od konserw o średnicy 1 km. Cały świat, nasze 101 poziomów, to wielkie pierścienie o coraz mniejszej średnicy, ułożone koncentrycznie wokół środka tej puszki. Puszka wiruje jak bąk, wykonując jeden obrót na minutę. Wskutek tego wytwarza się na poszczególnych pierścieniach siła odśrodkowa, oczywiście różna, zależnie od odległości danego pierścienia–poziomu od osi obrotu. I tak, na przykład, w odległości 440 m od osi — na 13 poziomie, który uważamy za wzorcowy — 1 dcm^3 wody waży na wadze sprężynowej pół kilograma[1], tu zaś ważyłby najwyżej 5 dkg."

We fragmencie tym spotykamy się z pojęciem „siła odśrodkowa". Ucząc się w szkole o ruchu obrotowym musimy na nie trafić. Na pierwszy rzut oka, nie ma w tym nic nadzwyczajnego. Siedząc na karuzeli, a każdy kiedyś siedział, wyraźnie czujemy, że coś wypycha nas na zewnątrz („od osi"). Jeśli jest to karuzela z krzesełkami na łańcuchach, widzimy, jak odchylają się one (na zewnątrz – od osi). Na małych karuzelach na placach zabaw dla małych dzieci stoją czasem platformy, które można obracać wedle woli. Każdy wie, że jeśli bardzo się je rozkręci, ci którzy nie trzymają się bardzo mocno zaczną spadać (od środka). Dla kręcących się dzieci siła odśrodkowa nie stanowi problemu. A potem idą do szkoły i okazuje się, że świat jest bardziej skomplikowany, niż się przypuszcza.

Po pierwsze na lekcjach zaczynają pojawiać się WZORY. Nie zawsze wiadomo dlaczego właśnie tak, nie zawsze jest jasne, co oznaczają występujące w nich literki, a co gorsza wzory te trzeba PRZEKSZTAŁCAĆ. Robi się to po to, by rozwiązać ZADANIE. Na przykład:

Zadanie 1: Jak długo trwał obrót Celestii dookoła własnej osi, jeśli na poziomie 14 w odległości 440 m od osi obrotu tam, gdzie mieszkali najbogatsi, każdy ważył połowę tego, ile ważyłby na Ziemi?

Rozwiązanie: Jak podają PODRĘCZNIKI w obracających się *układach odniesienia* pojawia się (skąd? – ale o tym za chwilę) siła zwana odśrodkową. Wszyscy wiedzą, że jej wartość obliczyć można odległość interesującego nas obiektu od osi obrotu (r) przez jego masę (m) i przez war-

[1] „Na „normalnym poziomie" Celestii panuje przyśpieszenie dwa razy mniejsze od ziemskiego, stąd wszystkie przedmioty są tam dwukrotnie lżejsze."

eprasa.pl 6365cfbfa2

tość *prędkości kątowej* obracającego się układu (ω – grecka litera „omega") podniesioną do kwadratu. Prędkość kątową mierzy się w *radianach* na sekundę. (Dla przypomnienia cały obrót – 360° – odpowiada 2π radianom (π to oczywiście 3,141592...), a więc, jeśli czas wykonania jednego obrotu, *okres obrotu*, oznaczyć literą T, to prędkość kątowa – ω jest równa $2\pi/T$).

Siła odśrodkowa, jak każda inna siła, gdyby masy, na jaką działa nic nie przytrzymywało na miejscu, nadałaby jej zgodnie z drugą zasadą Newtona ($F=ma$) odpowiednie przyspieszenie, równe dokładnie F/m. Grawitacja na powierzchni Ziemi przyspiesza ciała (jeśli pozwolić by im spadać swobodnie) mniej więcej o 10 m/s w każdej sekundzie. Inaczej mówiąc przyspieszenie grawitacyjne na powierzchni Ziemi to ~ 10 m/s^2. Na Celestii chcielibyśmy mieć pół tego w odległości 440 m od osi, czyli:

$$r \text{ i } m \text{ i } \frac{\omega^2}{m} = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 r = 5\left[\frac{m}{s^2}\right] \rightarrow T = 2\pi\sqrt{\frac{r}{5}} \approx 60\left[s\right]$$

co oznacza, że Celestia obracałaby się mniej więcej raz na minutę. Tak jak napisali to Boruń i Trepka, z czego można wyciągnąć wniosek, że i oni rozwiązali dawno temu to zadanie.

Dla mieszkańców Celestii, dzieci na karuzeli, pasażerów skręcającego gwałtownie autobusu siła odśrodkowa jest całkiem realna. Niektórzy jednak mają z nią problem, oczywiście jest to problem pozorny, co najwyżej można go nazwać nieporozumieniem, ale ponieważ istnieje, zajmijmy się nim.

Na internetowych stronach poświęconych fizyce, a nawet i w podręcznikach szkolnych napisano wiele „o naturze siły odśrodkowej", najczęściej, niestety, są to sądy, jeśli nie nieprawdziwe, niesłuszne, to co najmniej mylące i gmatwające wszystko zdecydowanie ponad potrzebę, czyniąc fizykę nauką trudną, niezrozumiałą i dziwaczną. Żeby nie być gołosłownym zacytuję kilka zdań z pierwszych stron, jakie podała mi moja wyszukiwarka, gdy wpisałem do niej hasło „siła odśrodkowa":

Pierwsza jest oczywiście Wikipedia[2], która stwierdza, że jest to „*sił* (chyba powinno być „siła"[3]) *bezwładności występująca w obracającym się układzie odniesienia*" i potem pojawia się wzór i właściwie to wszystko. Słusznie, ale czuć wyraźny niedosyt.

Na drugim miejscu pojawił się „Fizykon" [4], sieciowy podręcznik do fizyki pana Michała Dyszyńskiego, zbiór dość encyklopedyczny wiadomości oczywiście z fizyki. Stwierdzone jest tam, że „*Siła odśrodkowa jest siłą bezwładności. Oznacza to, że pojawia się ona tylko w układach nieinercjalnych i jest właściwie siłą pozorną – czyli nie jest powodowana konkretnym oddziaływaniem, ale wynika z ruchu samego układu odniesienia*" i dodaje, że „*Warto jednak pamiętać, że siła ta będzie „widziana" tylko z poziomu układu nieinercjalnego*".

I tu pokazana jest istota problemu: czy siła odśrodkowa w ogóle istnieje. Określenie „siła pozorna" sugeruje, że tylko nam się tak wydaje, że to złudzenie i tak naprawdę to jej nie ma. Dziwne dla kogoś, kto siedzi na karuzeli, bardzo dziwne dla mieszkańców Celestii, ale kontynuujmy nasz przegląd Internetu.

Kolejna strona nosi dumną nazwę naukowiec.org[5] i zaczyna się robić ciekawie: „*Siła dośrodkowa i siła odśrodkowa to pojęcia wyjaśniające to samo zdarzenie. Jednak teza, że są to te same siły tylko przeciwnie skierowane jest zbyt dużym uproszczeniem, są to dwie różne siły, na które wpływają różne składowe.*" i dalej „*Gdy będąc w zakręcie czujemy, jak działa siła odśrodkowa pamiętajmy, że dokładnie taka sama siła dośrodkowa działa na nas ...*" i jeszcze trochę innych podobnie formułowanych, i zapisanych niewiele rozjaśniających stwierdzeń.

Na dalszych miejscach moja wyszukiwarka skierowała mnie do blogów „Będąc młodym fizykiem"[6], czy „salon24: Siła dośrodkowa, czyli brednie fizyków"[7]. W wyjaśnianie istoty siły odśrodkowej zaangażowały się też różne fundacje: Fundacja Wolnej Myśli z organem „Racjonalista": siła odśrodkowa – co to jest"[8], Fundacja Nauka i Wiedza z „Edukatorem.pl"[9]. Mamy też na pierwszej stronie wyników wyszukiwania portal Sylwestra Kalinowskiego z II LO w Olsztynie nazwany ambitnie „e-fizyka"[10], z którego zaczerpnąłem ostatni już tu cytat: „*Nie ma sensu mówienie o równoważeniu się siły bezwładności z dośrodkową lub odśrodkową, ponieważ tam, gdzie jest siła bezwładności odśrodkowa, to nie ma ani siły dośrodkowej, ani odśrodkowej. Również siły dośrodkowa i odśrodkowa nie mogą się równoważyć. Obie występują w tym samym układzie odniesienia (IUO)*[11]*, ale są przyłożone do różnych ciał.*"

Poszukiwanie podobnych zdań, sądów i wygłaszanych, w najlepszej zapewne wierze, prawd nie wymaga większego wysiłku, każdy może zrobić to na własną rękę i na własną odpowiedzialność. Podsumowując moją zasygnalizowaną tylko wyżej internetową kwerendę muszę przyznać, że istniejące w temacie siły odśrodkowej zamieszanie intelektualne jest niesłychane i myślę, że pora przyłożyć się trochę, aby temat rozjaśnić. A jest to możliwe, bo na wyższym poziomie abstrakcji, tam, gdzie rozmawia się o fizyce konkretnie, gdzie istnieje dobrze zdefiniowany formalizm i gdzie wszystko, lub prawie wszystko jest dobrze zdefiniowane, problemu nie ma.

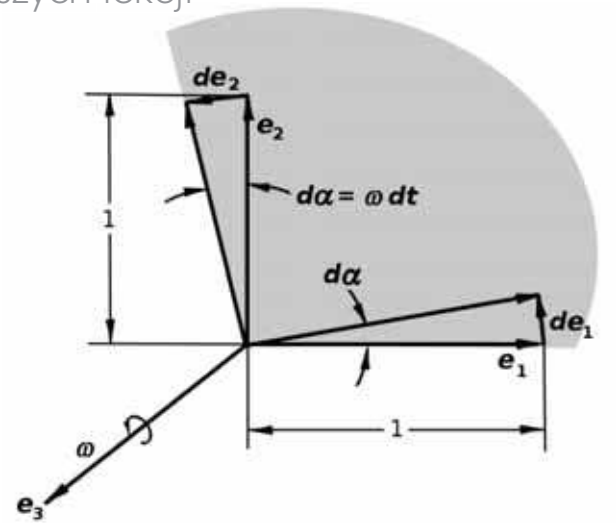
Większość solidnych podręczników akademickich jakoś radzi sobie z tym problemem – problemu nie ma! Kłopot w tym, że z niejasnych przyczyn (a może jasnych – o tym później) trudno jest praktycznie z wiedzą tą dotrzeć do tych, którzy po lekcji fizyki o ruchu obrotowym chcieliby jednak wiedzieć: „to jak to jest z tą siłą odśrodkową?"

Część tekstu poniżej dedykowana jest osobom o pewnym wykształceniu matematycznym. Nie będziemy rozwijać i tłumaczyć szczegółowo pewnych matematycznych

---

2 https://pl.wikipedia.org/wiki/Si%C5%82a_od%C5%9Brodkowa
3 uwaga moja (TW)
4 http://www.fizykon.org/rpo/dyn_sila_odsrodkowa.htm
5 http://www.naukowiec.org/wiedza/fizyka/sila-dosrodkowa_1034.html
6 http://mlodyfizyk.blox.pl/2007/09/W-szkole-nas-oszukali.html
7 https://www.salon24.pl/u/anty/655071,sila-dosrodkowa-czyli-brednie-fizykow
8 http://www.racjonalista.pl/forum.php/s,403435
9 https://www.edukator.pl/dynamika,3656.html
10 http://e-fizyka.info/index.php?t=13&id=103&opis=Sila-bezwladnosci-odsrodkowa
11 Inercjalny Układ Odniesienia

eprasa.pl 6365cfbfa2



pojęć, licząc, że, jeśli ktoś zechce, sam się w nie zgłębi, a jeśli komuś czasu szkoda, to szkoda. Ważny jest zarys idei.

Niech układ współrzędnych opisany jednostkowymi wektorami $\boldsymbol{e}_i$, nazywanymi czasami wersorami, skierowanymi odpowiednio wzdłuż osi *x, y* i *z*, obraca się wzdłuż osi *z*. Bardzo mały kąt $d\alpha$ o jaki obróci się układ w bardzo krótkim czasie *dt* określony jest oczywiście przez prędkość kątową.

Okazuje się, że może być ona traktowana jako wektor, a więc poza wartością, o której już wspominaliśmy, ma kierunek: wzdłuż osi obrotu i zwrot określony regułą śruby prawoskrętnej, taka dość oczywista umowa.

Zgodnie z obrazkiem obok zauważyć można, że po bardzo krótkim czasie jednostkowy wektora skierowany przed chwilą wzdłuż osi x – $\boldsymbol{e_1}$ – obróci się w dodatnim kierunku osi y – $\boldsymbol{e_2}$ –, a ten wzdłuż osi y – $\boldsymbol{e_2}$ – obróci się przeciwnie do kierunku osi x – $\boldsymbol{e_1}$ –, wzdłuż osi z – $\boldsymbol{e_3}$ – nie zmieni się.

Podsumowując takie obrazkowe rozważania i uogólniając je na obroty wokół dowolnych osi ludzie mądrzy, znający się na rachunku wektorowym zapisali swoje wnioski w postaci

$$d\,\boldsymbol{e}_i = \boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{e}_i dt$$

Znak x oznacza tu operację wektorowego mnożenia przez siebie dwóch wektorów. W jego wyniku z dwóch wektorów otrzymuje się trzeci o długości równej iloczynowi długości obu wektorów wejściowych i sinusa kąta między nimi (tego mniejszego od 180°, π radianów). Kierunek wektora iloczynu wektorowego jest prostopadły do jednego i drugiego wektora, a zwrot, zgodnie z ogólnie przyjętą umową, określa się przy użyciu śruby (prawoskrętnej oczywiście), a robi się to tak, że obraca się wektor, który występuje po lewej stronie znaku x w stronę drugiego z wektorów wejściowych tak, aby kąt zakreślony był mniejszy od 180° (π radianów) i sprawdza się, w którą stronę wkręca (wykręca) się śruba. Jest to trochę skomplikowany sposób.

Wymyślono i inne regułki, może i prostsze w zastosowaniach praktycznych. Każdy może sobie wybrać swoją ulubioną. Ważne jest, że wszystkie jednoznacznie i oczywiście tak samo określają zwrot iloczynu wektorowego. Iloczyn wektorowy jest dość dziwnym tworem i nie mamy tu miejsca na zastanawianie się nad nim w szczegółach.

Wyobraźmy teraz sobie spoczywający, inercyjny układ odniesienia, a w nim obracający się inny układ, już nieinercjalny, co się zaraz zresztą okaże. Niech obiekt, punkt materialny, mieszkaniec Celestii, którego ruch chcemy opisywać w układzie spoczywającym zdefiniowany jest wektorem $\boldsymbol{R'}$ o składowych *x'*, *y'* i *z'*. Ten sam punkt można też zidentyfikować w każdej chwili używając układu obracającego się, gdzie ma on współrzędne *x*, *y* i *z*.

$$\boldsymbol{R}' = x'\boldsymbol{e}'_1 + y'\boldsymbol{e}'_2 + z'\boldsymbol{e}'_3 = \boldsymbol{R} = x\boldsymbol{e}_1 + y\boldsymbol{e}_2 + z\boldsymbol{e}_3$$

Po jakimś, krótkim czasie obiekt nasz w układzie spoczywającym, primowanym, przesunie się, bo mogą na niego działać przecież jakieś siły. Zmienią się wartości współrzędnych x', y', z'. Obserwowany w układzie obracającym się (nieprimowanym) też przesunie się, ale jego współrzędne zmienią się inaczej, bo przecież wektory $\boldsymbol{e}_i$ cały czas się obracają.

Chcąc mówić o siłach działających w obu układach odniesienia, musimy, niestety, wyznaczyć najpierw, z jaką prędkością porucza się obiekt, a potem wyznaczyć jego przyspieszenie, a jedyną drogą do tego jest różniczkowanie po czasie.

$$\frac{d\boldsymbol{R}'}{dt} = \frac{dx'}{dt}\boldsymbol{e}'_1 + \frac{dy'}{dt}\boldsymbol{e}'_2 + \frac{dz'}{dt}\boldsymbol{e}'_3 + \frac{d}{dt}(y\boldsymbol{e}_2) + \frac{d}{dt}(z\boldsymbol{e}_3)$$
$$= \left(\frac{dx}{dt}\boldsymbol{e}_1 + x\frac{d\boldsymbol{e}_1}{dt}\right) + \left(\frac{dy}{dt}\boldsymbol{e}_2 + y\frac{d\boldsymbol{e}_2}{dt}\right) + \left(\frac{dz}{dt}\boldsymbol{e}_3 + z\frac{d\boldsymbol{e}_3}{dt}\right)$$

co daje oczywiście:

$$\frac{d\boldsymbol{R}'}{dt} = \left(\frac{dx}{dt}\boldsymbol{e}_1 + \frac{dy}{dt}\boldsymbol{e}_2 + \frac{dz}{dt}\boldsymbol{e}_3\right) + \left(x\frac{d\boldsymbol{e}_1}{dt} + y\frac{d\boldsymbol{e}_2}{dt} + z\frac{d\boldsymbol{e}_3}{dt}\right)$$

czyli zgodnie z równaniem (1)

$$\frac{d\boldsymbol{R}'}{dt} = V + \omega \cdot \boldsymbol{R}$$

i kolejne różniczkowanie da nam związek między przyspieszeniami w obu układach (operację różniczkowania, dla uproszczenia oznaczmy tu także kropką nad różniczkowaną wielkością):

$$\ddot{\boldsymbol{R}}' = \frac{d_2\boldsymbol{R}'}{dt_2} = \frac{d}{dt}\left(\frac{dx}{dt}\boldsymbol{e}_1 + \frac{dy}{dt}\boldsymbol{e}_2 + \frac{dz}{dt}\boldsymbol{e}_3 + \boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{R}\right) =$$
$$= \left(\ddot{x}\boldsymbol{e}_1 + \ddot{y}\boldsymbol{e}_2 + \ddot{z}\boldsymbol{e}_3\right) + (\dot{x}\boldsymbol{e}_1 + \dot{y}\boldsymbol{e}_2 + \dot{z}\boldsymbol{e}_3) + \boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{R} + \boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{R}$$

czyli ostatecznie

$$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}' - \boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{V} - \boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{R} - \boldsymbol{\omega}\times(\boldsymbol{V} + \boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{R}) =$$
$$= \boldsymbol{a}' - 2\boldsymbol{\omega}\times V - \boldsymbol{\omega}\times R - \boldsymbol{\omega}\times(\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{R})$$

Przenieśmy na lewą stronę całkowite przyspieszenie punktu materialnego znajdującego się na karuzeli kręcącej się z prędkością kątową $\boldsymbol{\omega}$ w odległości $\boldsymbol{R}$ od osi obrotu i poruszającego się dodatkowo (no bo czemu nie, każdy punkt może robić co chce) w układzie karuzeli z prędkością $\boldsymbol{V}$.

Wyobraźmy sobie teraz, że na punkt ten działa jakaś siła zewnętrzna $\boldsymbol{F}$ (na przykład suma siły grawitacji i naprężenia łańcucha, na jakim wisi krzesełko, albo też siły, z jaką śruby przytrzymują siedzisko na kręcącej się platformie, albo też siły mięśni, z jaką trzymamy się uchwytów). Otrzymamy wtedy, że nasz obiekt na karuzeli doznaje działania wypadkowej siły o wartości:

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}' - 2m\,\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{V} - m\,\boldsymbol{\omega}\times - m\,\boldsymbol{\omega}\times(\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{R})$$

Widzimy tu cztery wyraźnie wydzielone składniki. Pierwszy to „zwykła” siła biorąca się na przykład od ja-

eprasa.pl 6365cfbfa2

kiejś sprężyny, drugi zależy od prędkości ciała w układzie karuzeli. Jeśli ktoś siedzi spokojnie na krzesełku. Człon ten jest równy zero. Trzecia siła związana jest ze zmianą prędkości obrotu. Jeśli karuzela kręci się ze stałą prędkością i ten człon znika. Nie znika za to nigdy człon ostatni. Wygląda on trochę skomplikowanie, ale to tylko złudzenie. W przypadku karuzeli prędkość kątowa jest prostopadła do promienia – odcinka od danego punktu do osi obrotu, a więc wszystkie kąty w iloczynach wektorowych są równe 90° (π/2 w radianach), a więc sinusy są równe 1 i wartość ostatniej siły to $m\omega^2R$. Tak, to siła odśrodkowa! Sprytna kombinacja iloczynów wektorowych zapewnia, że niezależnie od wyboru układu współrzędnych na karuzeli będzie ona zawsze skierowana od osi obrotu.

W tym miejscu można jest akurat właściwy moment, aby poświęcić jedno zdanie na rozstrzygnięcie wspomnianych wyżej niejasności pojawiających się na internetowych stronach dotyczących realności i wzajemnego stosunku siły odśrodkowej i dośrodkowej. Zapiszmy, co zostaje z naszego równania, gdy w układzie obracającym się nic się nie porusza, prędkość kątowa ruchu obrotowego jest stała:

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}' - m\,\boldsymbol{\omega}\times(\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{R})$$

Ponieważ badane ciało ma się w układzie obracającym nie poruszać (człowiek siedzący spokojnie na krzesełku, planeta wokół gwiazdy, ciężarek kręcący się na lince, jak to ma miejsce w mnóstwie zadań z fizyki) działająca nań siła musi być równa zeru ($\boldsymbol{F} = 0$) i wtedy

$$\boldsymbol{F}_{\text{dośrodkowa}} = \boldsymbol{F}' = -(-m\,\boldsymbol{\omega}\times(\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{R})) = -\boldsymbol{F}_{\text{odśrodkowa}}$$

Siła dośrodkowa, to siła, jaką można zmierzyć w układzie nieobracającym się, która jest konieczna, aby badane ciało poruszało się po okręgu (siedziało grzecznie na karuzeli, krążyło wokół swojego słońca, wisiało i kręciło się na sznurku), a siła odśrodkowa to siła z jaką ktoś na karuzeli musi trzymać się krzesełka by nie wylecieć, dodatkowa siła, z jaką kręcący się na sznurku ciężarek napina ten sznurek. I aby tak się to wszystko kręciło i kręciło, siły te muszą się równoważyć.

Rozumowanie przedstawione powyżej może jest nieco niejasne, bo z matematycznego puntu widzenia skomplikowane trochę, ale jeśli uwierzymy, że operacja różniczkowania iloczynu i odrobina kombinacji z rachunku wektorowego zostały przeprowadzone poprawnie, to kwestia siły odśrodkowej wyjaśniła się sama. Nie ma co zastanawiać się nad jej realnością, w układach obracających się jest jak najbardziej realna. Niektórzy wątpią w tę realność i stąd pojawiające się niekiedy razem z określeniem „siła odśrodkowa" słowo „pozorna". Nie wiem, co powiedział James Bond w filmie „Moonraker", gdy złoczyńca rozkręcił go w wirówce do przyspieszenia 14 g.

Przy okazji króciutkie zadanie:

Zadanie 2: Jak długie było ramię wirówki arcyzłego Hugo Draxa, w której skośnooki Chang rozkręcił Bonda do tak olbrzymich przyspieszeń?

Rozwiązanie: Szczegółowa analiza filmu pokazuje, że w krytycznej chwili wirówka kręciła się z szybkością 1 raz na sekundę. Możemy przekształcić trochę wzór z pierwszego zadania by otrzymać

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 r = 14\,\text{i}\,10\left[\frac{m}{s^2}\right] \rightarrow r = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \text{i}\,140 \approx 3{,}5\left[m\right]$$

To dziwne, ale na filmie ramię wirówki jest najmniej dwa razy dłuższe. Widać kręcący film o Bondzie zwracali mniejszą uwagę na szczegóły. W końcu nie pomylili się bardzo. Dodatkowe pytanie dla miłośników Bonda: Czy gdyby rozkręcili wirówkę filmową (o ramieniu długości ~10 m) do tej samej prędkości kątowej, ile ważyłby Bond i czy miałby w związku z tym szansę, aby to przeżyć?

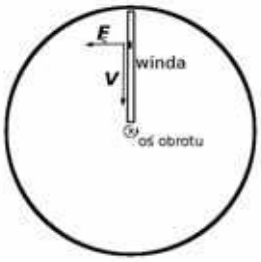
Siłę odśrodkową wykorzystywano na Celestii do imitowania ciążenia. Jest to sposób dość powszechnie stosowany w wielkich statkach kosmicznych w większości filmów o podróżach kosmicznych. Choć czasem bywa odwrotnie. Niektórzy może przypominają sobie scenę z filmu Kubricka z 1968 roku „Odyseja kosmiczna 2001", w której doktor Frank Poole biega w kółko po ścianach obracającej się części statku kosmicznego „Discovery". Oczywiście ekipa filmowa nie wystrzeliła się w przestrzeń, gdzie mogła rozkręcić swój filmowy plan i filmować efekt działania siły odśrodkowej udającej grawitację. Stanley Kubrick użył grawitacji ziemskiej, do imitowania siły odśrodkowej, która miała imitować grawitację. Ciekawych, jak to zrobił, zachęcam do sprawdzenia szczegółów w sieci.

Warto wspomnieć, że, jeśli nasze obracające się laboratorium jest małe, bardzo małe, znacząco mniejsze od odległości od osi obrotu (i nie ma okien), badając lokalnie ruch niedużych przedmiotów i siły na nie działające, nigdy nie będziemy w stanie stwierdzić, czy aby na pewno obracamy się, czy może też coś nas jednak przyciąga. Siła odśrodkowa jest (lokalnie) od grawitacji nieodróżnialna.

I właściwie moglibyśmy skończyć w tym miejscu, gdyby nie dwa człony w naszym ostatnim równaniu, które znikały, jeśli na jednostajnie kręcącej się karuzeli siedzieliśmy spokojnie.

Wróćmy do „Zagubionej przyszłości". Jest tam krótka wzmianka o windach:

[...] ruch obrotowy Celestii powodował zjawisko przyciskania pasażerów do jednej ze ścian, zależnie od kierunku ruchu windy: w górę czy w dół.



Każdy z nas jechał kiedyś windą. Jakoś nie odczuwa się podczas jazdy, aby coś przyciskało nas do jednej ze ścian.

A jednak! Siła

$$\boldsymbol{F}_c = -2m\,\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{V}$$

znana jest ze szkoły, może nawet bardziej z lekcji geografii niż fizyki. Ta siła działa w układzie obracającym się na ciała poruszające się. Ma ona swoją nazwę, wzięła się ona od nazwiska matematyka, inżyniera, mechanika, ogólnie francuskiego XIX-wiecznego naukowca, specjalisty od zderzeń bilardowych kul Gasparda-Gustawa de Coriolisa. To on jako pierwszy mówił o pracy równej iloczynowi siły i przesunięcia i o energii kinetycznej ($mv^2/2$).

Sama nazwa „siła Coriolisa" pojawiła się i przyjęła w nauce długo po śmierci jego samego, gdy zauważono jej

eprasa.pl 6365cfbfa2

znaczenie w meteorologii. Wszyscy wiedzą o tym, że cyklony kręcą się na północnej półkuli w lewo, na południowej w prawo. I wszyscy wiedzą, że zawdzięczają to sile Coriolisa. Niektórzy twierdzą też, że wir w wannie na obu półkulach też kręci się zgodnie z tą samą zasadą. Ale wróćmy do windy. Rozwiążmy najpierw kolejne proste zadanie:

Zadanie 3: Jak duża siła przyciskała do ściany mieszkańców Celestii i dlaczego my jakoś nie zauważamy tego efektu?

Rozwiązanie: Nie jest to specjalnie złożony problem, wystarczy policzyć, no i ustalić, jak szybko poruszała się winda na Celestii. Wiemy, że poruszała się ze zmienną prędkością przyspieszając i zwalniając na długości około dziesięciu poziomów, a całą prawie drogę, powiedzmy 400 metrów pokonywała w kilkadziesiąt sekund. Przyjmijmy, że jechała średnio jakieś pół kilometra na niecałą minutę, czyli ~ 10 m/s. Wartość ω, jak już ustaliliśmy to 2π na minutę, czyli na człowieka o masie powiedzmy 50 kg działała siła:

$$\left|\boldsymbol{F}_c\right| = \left|-2m\ \boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{V}\right| = 2\,\mathrm{i}\,50\left(\frac{2\pi}{60}\right)\mathrm{i}\,5 \approx 100\left[\mathrm{N}\right]$$

To całkiem dużo, zważywszy, że pozorny ciężar tego samego człowieka, gdy wsiadał do windy na dolnym poziomie to niewiele ponad dwa razy więcej. W windach na Celestii musiało nieźle rzucać, nawet, jeśli przeceniliśmy szybkość ich przemieszczania się.

Przy poruszaniu się w obracającym się układzie wzdłuż promienia, pojawienie się (znikąd) dodatkowej siły, siły Coriolisa, może być wyjaśnione bez odwoływania się do skomplikowanych rachunków na wektorach i używania śruby prawoskrętnej. Uczynili tak też Boruń i Trepka opisując sytuację, jak miała miejsce na Celestii, gdy do świata opanowanego przez chylący się ku nieuchronnemu upadkowi rasistowski wręcz system wyzysku klas pracujących przez garstkę podłych, rządnych władzy i ideologicznie zatwardziałych kapitalistów, zbliżał się technologicznie znacznie bardziej zaawansowany astrobolid. Wysłano go z Ziemi z załogą, w której ważną funkcję astrozofa pełnił nasz rodak, pochodzący z Warszawy, jednego z najpiękniejszych miast świata XXIV wieku, Andrzej Krawczyk. Ale szczegóły, wraz z opisem naszej stolicy za czterysta lat każdy może znaleźć w książce.

Nas interesuje sytuacja trójki szlachetnych młodych, ideowych i ogólnie postępowych przedstawicieli inteligencji pracującej starających się dotrzeć do obserwatorium astronomicznego od zewnątrz przez śluzę znajdującą się na ostatnim poziomie Celestii. Przemierzali oni kolejne poziomy mijając bariery ostrych podziałów technologicznych i społecznych.

Do poziomu 95. dotarli windą, o której już wspomnieliśmy i niedługo potem młodzi bojownicy o słuszną sprawę mieli spotkać się z tą samą siłą (Coriolisa) nieco bardziej bezpośrednio i niekiedy nawet boleśnie. Winda docierała bowiem tylko na odległość 14 metrów od osi.

Następne kilka poziomów trzeba było pokonać przy użyciu własnych mięśni. Jak już wiemy siła odśrodkowa maleje, gdy zbliżajmy się do osi obrotu i sztuczna grawitacja staje się zatem coraz słabsza. Można łatwo policzyć, że na poziomie 96 osiąga dziesiątą część tego co na poziomach zewnętrznych, tak więc do sufitu nie trzeba było drapać się po drabinie, a można było bardzo łatwo doskoczyć.

Doświadczony konstruktor Kruk bez problemów osiągnął w ten właśnie sposób właz w suficie, jednak Daisy, ambitna reporterka telewizyjna podskoczyła tak, jak zwykła podskakiwać na poziomach, gdzie dominuje sztuczna grawitacja.

„Daisy odbiła się od podłogi za słabo i zbyt blisko drabiny tak, iż wpadła na nią już na wysokości 3 m od ziemi. Gdyby nie to, że wysunęła przed siebie ręce i szybko uchwyciła się metalowych prętów, niefortunny skok mógł zakończyć się potłuczeniem. […]

Kruk obiecał, że wszystko jej wyjaśni. Nam pomogą w tym dwa rysunki zaczerpnięte z książki Borunia i Trepki, a w książce pomógł Daisy zrozumieć co nieco eksperyment z zeskakiwaniem z drabiny:

„Daisy skoczyła i ciało jej zamiast spaść na ziemię tuż obok, przebiegło łukiem przez salkę i zetknęło się z podłogą w odległości około 2 m od *podstawy drabiny.*

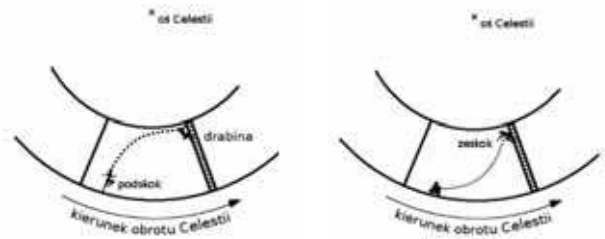
- A to dopiero! - zdziwiła się reporterka.

- Nie wiesz sama, jak byłaś bliska prawdy mówiąc, że coś cię rzuciło na drabinę. Celestia wykonuje jeden obrót w ciągu 60 sek. Podłoga tego pomieszczenia znajduje się w odległości 14 m od osi świata, a więc porusza się ona po okręgu z prędkością bliską 1,5 m/sek. Poziom ten ma wysokość 5 m. Sufit sali jest więc oddalony o 9 m od środka Celestii, z czego łatwo obliczyć, że prędkość jego po obwodzie koła, które zatacza wraz z całym światem, wynosi około 1 m/sek. Wynika stąd, że dolne szczeble drabiny poruszają się blisko o pół metra na sekundę szybciej niż górne. Gdy podskoczysz do góry, rzuci tobą na drabinę, licząc bowiem od miejsca, w którym stoisz, znajduje się ona w kierunku ruchu Celestii wokół osi. W momencie skoku ciało twoje ma prędkość 1,5 m/sek. i z tą prędkością porusza się również, gdy jest w powietrzu, mimo że okoliczne przedmioty na tej wysokości poruszają się już z prędkością mniejszą. Stąd - zbliżasz się do drabiny.

- Powiedzmy, że rozumiem… A z powrotem? Jak zeskakiwałam?

- Gdy stałaś wysoko na drabinie, a więc bliżej osi Celestii, ciało twoje miało mniejszą prędkość niż podłoga, dlatego też spadając swobodnie na ziemię nie znalazłaś się wprost pod miejscem skoku, lecz poruszająca się szybciej podłoga wyprzedziła ciebie.”

Czyż to nie proste? Tajemnicza siła Coriolisa, o której szkolne podręczniki wręcz boją się mówić staje się, przynajmniej w swoim najprostszym wydaniu niemal elementarna. Sprawdźmy, jak to jest z windami i radialnymi podróżami na Ziemi. Rozwiążmy zadanie o sile działającej na pasażera windy poruszającej się ruchem jednostajnym w górę, czy w dół.



eprasa.pl 6365cfbfa2

Zadanie 4: A jak jest na Ziemi?

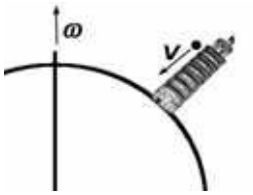
Rozwiązanie: W typowym bloku winda porusza się wolniej: metr, dwa na sekundę. Najszybsze windy osiągają kilkanaście metrów, najwyżej 20 na sekundę. Co do prędkości kątowej to jest ona powszechnie znana od czasów Kopernika i wynosi jeden obrót dziennie. Potrzebujemy jeszcze wiedzieć, jaki jest kąt pomiędzy prędkością kątową a kierunkiem pionowym na naszych szerokościach geograficznych. Nasza szerokość geograficzna to jakieś 50°, czyli sinus kąta, o jaki nam chodzi to około 0,60. Podsumowując:

$$\left|\boldsymbol{F}_c\right| = \left|-2m\ \boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{V}\right| = 2\,\mathrm{i}\,50\left(\frac{2\pi}{24\,\mathrm{i}\,60\,\mathrm{i}\,60}\right)\mathrm{i}\ 2\,\mathrm{i}\,0{,}6 \approx 0{,}01\left[\mathrm{N}\right]$$

a to jest znowu bardzo, bardzo mało. Niewyczuwalnie mało.

Inny przykład ruchu w kierunku promienia to znany ze szkoły spadek swobodny. Czy nie popełnialiśmy aby błędu przyjmując, że rzucając coś w górę, lub w dół mamy do czynienia jedynie ze stałą (w rozsądnych granicach) siłą ciężkości? Początki naszej wiedzy o ruchu ciał wzięły się z obserwacji Galileusza przeprowadzonych w Pizie. Czy uwzględnienie siły Coriolisa nie wpłynęło na jego obserwacje. Trzeba by to sprawdzić.

Zadanie 5: Upuszczamy, jak Galileusz, metalową kulkę z krzywej wierzy w Pizie. Czy aby na pewno spadnie ona pionowo (w punkcie, który wskazałby ciężarek opuszczony z wieży na długim sznurku)? A jeśli nie (bo oczywiście nie), to jak daleko od tego punktu.



Rozwiązanie: I znów mamy sytuację windy, tylko teraz porusza się ona w dół i to tym razem złośliwie, niejednostajnie. Na lecącą kulkę działać będzie oczywiście siła Coriolisa skierowana w kierunku wschód-zachód, lecz będzie ona zmieniać się w czasie. Policzenie dokładne tego, gdzie upadnie kulka wymagałoby scałkowania odpowiedniego wzoru. My oszacujmy wynik, by sprawdzić, czy w ogóle mamy szansę zaobserwować jakikolwiek efekt. Powiedzmy, że wieża ma 50 metrów wysokości. Ciało spuszczone z takiej wysokości dotrze na dół po trochę ponad 3 sekundach. To każdy wie ze szkoły. Po sekundzie będzie miało prędkość 10 m/s po dwóch sekundach 20 m/s, a na dole 30 m/s. Ruch jednostajnie przyspieszony! Przyjmijmy, że prędkość jakby średnia to ta środkowa wartość ~20 m/s. Szerokość geograficzna Pizy to prawie 45°. Wszystkie potrzebne dane już mamy:

$$\left|\boldsymbol{a}\right| = \left|-2\ \boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{V}\right| = 2\left(\frac{2\pi}{24\,\mathrm{i}\,60\,\mathrm{i}\,60}\right)\mathrm{i}\ 20\,\mathrm{i}\ \sin(45°) \approx 0{,}002\left[\mathrm{m/s^2}\right]$$

nie jest to szczególnie dużo. Odległość, jaką pokonałoby przez 3 sekundy ciało startujące z takim przyspieszeniem to niecały centymetr. Dokładniejszy wynik, otrzymany po odpowiednim, męczącym całkowaniu dokładnych wzorów to około 0,8 cm.

Nie powiedzieliśmy jeszcze nic o kierunku tej poprawki. Obracając wektor **ω** przedstawiony na rysunku w kierunku wektora prędkości spadającego ciała (zgodnie z kątem mniejszym od półpełnego) iloczyn wektorowy ($\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{V}$) „wychodzi z kartki" biorąc pod uwagę, że we wzorze na siłę Coriolisa jest znak „–" dodatkowe przesunięcie ma kierunek wschodni.

Rozumowanie przedstawione przez Borunia i Trepkę w ich książce tłumaczy zachowanie ciał poruszających się wzdłuż promienia do, lub od osi obrotu. Pasuje do sytuacji w windzie, pasuje też do podróży po powierzchni Ziemi w kierunku południkowym. Na dużych szerokościach geograficznych nasz ruch obrotowy, jeśli trzymamy się powierzchni Ziemi, jest wolniejszy niż na równiku, a na biegunie samym nie kręcimy się w ogóle. I tym samym idąc od bieguna północnego do równika, powierzchnia Ziemi nas wyprzedza, czyli możemy uznać, że coś spycha nas na zachód. Przekroczywszy równik i podążając dalej na południe powierzchnia Ziemi nie nadąża za nami, czyli wygląda to tak, jakby coś spychało nas na wschód. I to wszystko by się może i zgadzało, ale co będzie, jeśli postanowimy poruszać się wzdłuż równoleżnika?

Tłumaczenie konstruktora Kruka niestety w takim przypadku nie działa, a przynajmniej nie zgadza się z tym, co wynika z precyzyjnego opisu ruchu w obracającym się układzie. Jak działa siła Coriolisa, jeśli idziemy po równiku ze wschodu na zachód? Kierunek przeciwny do iloczynu wektorowego ($\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{V}$) to kierunek w dół, wciskający nas w ziemię, jeśli pójdziemy na wschód, będziemy czuć się lżejsi. Efekt ten został zauważony po raz pierwszy dopiero na początku XX wieku przez barona Rolanda von Eötvös, jednego z największych fizyków węgierskich, specjalistę od doświadczalnego badania grawitacji i nazwany został jego nazwiskiem.

Zadanie 6: Jaka jest różnica w ciężarze samochodu o masie 1 tony jadącego po równiku z prędkością 100 km/h na wschód i na zachód?

Rozwiązanie: Po raz kolejny stosujemy ten sam wzór:

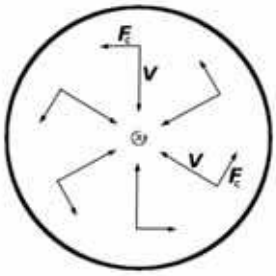
$$\left|\boldsymbol{F}_c\right| = \left|-2m\ \boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{V}\right| = 2\,\mathrm{i}\,1000\left(\frac{2\pi}{24\,\mathrm{i}\,60\,\mathrm{i}\,60}\right)$$

$$\mathrm{i}\,100000/(60\,\mathrm{i}\,60) \approx 4\left[\mathrm{N}\right]$$

Różnica w obu kierunkach jest oczywiście dwa razy większa. Nie jest to wiele, ale jednak.

Jeśli poruszamy się nie po równiku, a po jakimś innym równoleżniku, siła Coriolisa ciągle istnieje i ciągle zachowuje oczywiście kierunek prostopadły do $\boldsymbol{\omega}$ i do $\boldsymbol{V}$. Szczęśliwie się składa, że iloczyn wektorowy jest rozdzielny, wiec możemy rozłożyć prędkość kątowa Ziemi na składową prostopadłą do powierzchni Ziemi i do niej równoległą. Dla dowolnie skierowanej prędkości $\boldsymbol{V}$ możemy zapisać $\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{V} = \boldsymbol{\omega}_{\parallel}\times\boldsymbol{V}\times\boldsymbol{\omega}_{\perp}\times\boldsymbol{V}$. Pierwszy z iloczynów po prawej stronie skierowany jest pionowo (to on dominuje na równiku) i nie interesuje nas specjalnie, drugi natomiast jest skierowany poziomo i prostopadle do prędkości, czyli na północ, lub południe i to on właśnie odpowiada za powstawanie cyklonów.

Cyklony tropikalne powstają wtedy, gdy nagrzane powietrze z jakiegoś gorącego rejonu unosi się jako lżejsze do góry. Na jego miejsce natychmiast napływa ze wszystkich stron powietrze chłodniejsze, które też chce się ogrzać. No a Ziemia się obraca. Na półkuli północnej wektor prędkości kątowej Ziemi ma na powierzchni składową prostopa-



eprasa.pl 6365cfbfa2

dłą skierowaną w górę, tak, jak pokazuje to rysunek. Na wiatr wiejący ku środku cyklonu działają na półkuli północnej siły odchylające go przeciwnie do ruchu wskazówek zegara – $\boldsymbol{\omega}_{\perp}\times\boldsymbol{V}$. Na półkuli południowej wiatry wieją także do środka, lecz teraz prędkość kątowa Ziemi ma składową prostopadłą do powierzchni skierowaną w dół, czyli przeciwnie niż pokazuje rysunek, a zatem wszystkie siły Coriolisa mają przeciwny zwrot. Jakież to proste!

Niektórzy też twierdzą, że woda wlewająca się z wanny na półkuli północnej ma zawsze kierunek przeciwny do ruchu wskazówek zegara. Oczywiście, każdy, kto ma w domu wannę może to sprawdzić, ale doświadczenie pokazuje, że ze zwykłego lenistwa niektórzy, zamiast to samemu eksperymentalnie zweryfikować, powtarzają takie głupoty. Ale ktoś dociekliwy mógłby zapytać: „Ale właściwie - dlaczego? Czy siła Coriolisa w wannie nie działa?"

Odpowiedzmy na te pytania rozwiązując kolejne proste zadanie:

Zadanie 7: Jaka jest wartość przyspieszenia nadawanego przez siłę Coriolisa wodzie wypływającej z wanny?

Rozwiązanie: Ciągle korzystamy z tego samego wzoru. O prędkości kątowej wiemy już wszystko, potrzebujemy tylko wiedzieć coś o prędkości wpływającej do odpływu wody. Jeśli przyjmiemy, że przez minutę z wanny woda wypływa z szybkością 10 litrów na minutę przez otwór o powierzchni, dla równego rachunku, 10 cm^2, to przez minutę przeciska się przezeń woda jakby z walca o podstawie 10 cm^2 i objętości 10 litrów. Walec taki miałby wysokość równej (0,01 m^3)/(0.001 m^2) czyli 10 m. Tak więc woda wypływa na pewno nie szybciej niż 10/60 m/s ≈ 15 cm/s. Jest to wynik sporo zawyżony, bo my pytamy o prędkość wody w kierunku otworu, a ta może być powiedzmy 10 razy mniejsza, ale trzymajmy się tej maksymalnej wartości. Nasze rachunki pokażą górne ograniczenie na siłę Coriolisa w wannie.

$$\left|\boldsymbol{F}_c/m\right| = \left|-2\ \boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{V}\right| = 2\left(\frac{2\pi}{24\,\mathrm{i}\,60\,\mathrm{i}\,60}\right)\mathrm{i}$$
$$\mathrm{i}\,0{,}15\,\mathrm{i}\,0{,}6 \approx 0{,}00001\left[\mathrm{m/s^2}\right]$$

dziesięć milionowych części niutona. To nie może wpłynąć na nic!

Siła Coriolisa bierze się z tego, że układ porusza się ruchem obrotowym, z drugiej strony jest ona zawsze prostopadła do prędkości, a jeśli prędkość kątowa jest stała w każdym punkcie, to i wartość jej jest cały czas taka sama. Jeśli ktoś pamięta jeszcze coś ze szkoły, albo choćby z początku tego artykułu, to zauważy, że są to warunki, jakie spełnia siła dośrodkowa. Jeśli ktoś studiował ruch ładunków w polu magnetycznym, to wie, że cząstki te, jeśli nadać im odpowiednią prędkość (prostopadłą do wektora indukcji) będą krążyć po okręgach określonych przez wartość promienia Larmora.

Zadanie 8: Czy w przypadku ruchu w układzie obracającym się mamy sytuację analogiczną? A jeśli tak (bo tak), to jaki jest promień okręgu dla piłki silnie kopniętej przez Lewandowskiego?

Rozwiązanie: Prędkość piłki może sięgać nawet 150 km/h. Przyspieszenie spowodowane siłą Coriolisa, gdyby Lewandowski kopał gdzieś w Polsce byłoby zatem równe

$$\left|\boldsymbol{a}_c\right| = \left|-2\ \boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{V}\right| = 2\left(\frac{2\pi}{24\,\mathrm{i}\,60\,\mathrm{i}\,60}\right)\mathrm{i}$$
$$\mathrm{i}\,150000/(60\,\mathrm{i}\,60)\,\mathrm{i}\,0{,}6 \approx 0{,}004\left[\mathrm{m/s^2}\right]$$

i ma to być przyspieszenie dośrodkowe piłki, a więc

$$V_2/R = 0{,}004\left[\frac{m}{s^2}\right] \rightarrow R \approx 500\left[km\right]$$

Jedno pełne okrążenie zajęłoby piłce jakieś 20 godzin (oczywiście cały czas musiałaby zachować taką samą prędkość!)

O sile Coriolisa można by jeszcze wiele, choćby kwestia meandrowania, czy wahadło Foucaulta, ale zostawmy to na inne okazje, bo w naszym podstawowym równaniu

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}' - 2m\,\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{V}\Big| - m\,\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{R} - m\,\boldsymbol{\omega}\times(\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{R})$$

jest jeszcze jeden człon, o którym rzadko, lub nawet wcale w podręcznikach się wspomina. To człon zawierający przyspieszenie kątowe $\boldsymbol{\omega}$. Siła z nim związana nazywa się siłą Eulera. Siła ta oczywiście pojawia się, gdy rozpędza się i hamuje karuzela i to ona wciska nas w fotelik w pierwszym przypadku i wyrzuca z niego w drugim. Nad tym nie ma się co specjalnie zastanawiać, ciekawsze rzeczy zaczynają się dziać, gdy rozkręcony układ odniesienia zaczyna zmieniać kierunek swoich obrotów, czyli, gdy oś nie trzyma kierunku!

Pewnie każdy jako dziecko bawił się bąkiem. Rozkręcało się go, a on długo się kręcił, wykonując przy tym całkiem skomplikowany taniec, nim wreszcie zatrzymał się i padł. Zapewne każdy widział też eksperyment z rozkręconym kołem rowerowym, którego pozioma os obrotu utrzymywana była tylko na jednym końcu, zaczepiona na przykład na sznurku wiszącym z sufitu. Koło obracało się szybko, a jednocześnie powoli obracała się oś wokół swojego punktu zaczepienia.

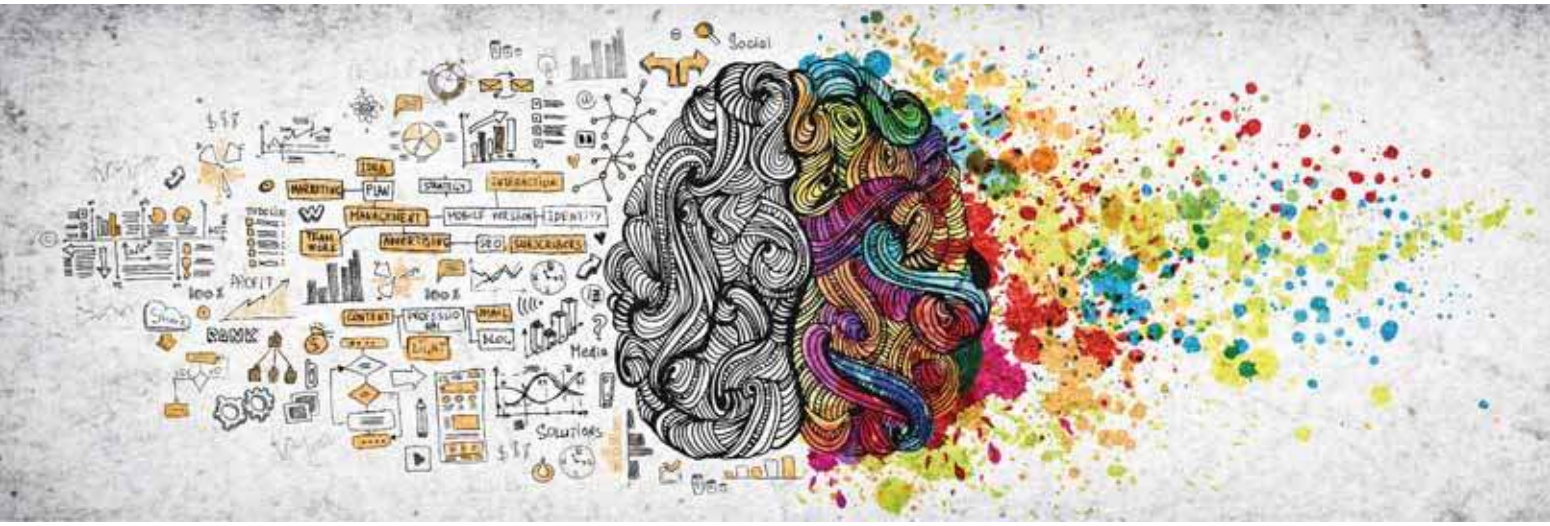
Są też w sieci dostępne filmiki z rozkręcanymi kołami rowerowymi trzymanymi przez kogoś, kto siedzi na obrotowym krześle. Ktoś ten przekręca oś obrotu koła o 180° i krzesełko, na którym siedzi, zaczyna się wtedy obracać, lub zmienia kierunek obrotów, jeśli obracało się wcześniej.

Nie wszyscy wiedzą, że Ziemia obracając się wokół własnej osi chyboce się odrobinę. Już przed naszą erą Hipparch zauważył, że północ geograficzna przesuwa się po niebie o 1° na stulecie. Ponieważ dokładne położenie w przestrzeni Ziemi i każdego punktu na jej powierzchni jest ważne i coraz ważniejsze, Międzynarodowa Unia Astronomiczna razem z Międzynarodową Unią Geodezji i Geofizyki powołały trzydzieści lat temu Międzynarodową Służbę Ruchu Obrotowego Ziemi i Systemów Odniesienia.

Ale skąd ten problem? Jakaż to siła obraca krzesełkiem? Jaka siła odpowiada za precesję i nutację bąków i całej Ziemi? Dociekliwy Czytelnik zapewne domyśla się, że najbardziej podejrzaną jest tu siła Eulera, ale podejrzenia trzeba jeszcze udowodnić, a to jest już temat na osobną historię.

Tadeusz Wibig
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Uniwersytetu Łódzkiego```

eprasa.pl 6365cfbfa2



Czynniki wpływające na zapamiętywanie wiedzy

Wnioski z aktualnych badań i wskazówki dydaktyczne

Andrzej **Sokołowski**

Treści fizyki, które chcemy by uczeń zrozumiał i zapamiętał są trudne nie tylko ze względu na kompleksowość zjawisk fizycznych, ale również ze względu na ich wielorakie przedstawianie: czy to w formie doświadczenia, modelowania matematycznego, graficznie, wektorowo lub jako matematyczny wzór. Z pewnością życzeniem każdego nauczyciela jest, by uczeń nie tylko zrozumiał przekazywaną mu wiedzę, ale ją również zapamiętał, tak by mógł tę wiedzę odtworzyć podczas rozwiązywania zadań. Życzenie to pozostaje często niezrealizowane, co powoduje frustrację nauczyciela i ucznia.

Tematem tego artykułu jest przedstawienie ogólnych mechanizmów rządzących procesem zapamiętywania i sugerowanie dydaktycznych rozwiązań, które mogą pomóc nauczycielowi w przekazywaniu wiedzy i uczniowi w jej zapamiętywaniu.

Struktura pamięciowa umysłu: pamięć robocza i pamięć długoterminowa

Paas[1] stwierdził, że w mózgu człowieka są dwie główne struktury wpływające na szybkość przetwarzania i zapamiętania wiedzy: pamięć robocza (*working memory*) i pamięć długoterminowa (*long-term memory*). Pamięć robocza jest etapem, gdzie wszystkie impulsy: wizualne, słuchowe, werbalne, kinestetyczne, zapachowe, itp. tworzą bodźce, by umysł przetworzył je tak, by mogły być dalej przesłane do pamięci długoterminowej.

Pamięć robocza ma ograniczoną pojemność i jest uzależniona od indywidualnej predyspozycji. Natomiast pamięć długoterminowa ma nieograniczoną pojemność. Intersującym elementem w procesie zapamiętywania jest fakt, że informacja musi być najpierw przyswojona/doświadczona i zrozumiana przez kanał pamięci roboczej.

Nowa wiedza ma szanse być zakodowana w pamięci długoterminowej, jeśli jest najpierw zrozumiana na etapie pamięci roboczej. Praktycznie, jeśli uczniowie są poddani dużej dozie i trudnej do zrozumienia wiedzy, mogą się oni czuć przytłoczeni i zniechęceni co jest wynikiem tego, że ich umysł nie może tej wiedzy usystematyzować na bazie tego, co do tej pory wiedzą o danym zagadnieniu.

Na przykład, jeśli nie poświęcimy wprowadzającej jednostki lekcyjnej na wykształcenie w uczniach poczucia celu i umiejętności rozłożenia trajektorii ruchu ukośnego na funkcje położenia ciała w kierunku pianowym i poziomym, to wnikliwsza analiza tego ruchu będzie dla ucznia nie do zrozumienia. Jakkolwiek uczniowie mogą obserwować i opisać trajektorię ruchu, (jako paraboliczną) brak zrozumienia podstaw matematycznych opisu tego ruchu spowoduje, że fizyczna interpretacja nie będzie miała podbudowy merytorycznej i całe zagadnienie nie będzie zaakceptowana przez kanał pamięci roboczej ucznia. Informacja ta będzie zablokowana i nie pozostawi ona żadnych impulsów w pamięci długoterminowej uczniów, co prowadzi do powtórzenia lekcji. Czy jest to wina uczniów? Otwarcie stwierdźmy, że nie zawsze, chociaż pewnie wygodnie byłoby stwierdzić, że tak.

Zgodnie z badaniami, każdy ma inną pojemność pamięci roboczej i inną szybkość przetwarzania zewnętrznych impulsów na przyswajalne bodźce wewnętrzne. Jedni zrozumieją przekazany temat szybciej niż inni, co oczywiście zależy również od tego czy uczeń chce albo posiada wewnętrzną motywację, by dane zagadnienie zrozumieć.

Nawiązując do wspominanego przykładu ruchu ukośnego, powiedzmy, że uczniowie nauczyli się formułować funkcje położenia ciała, ale mają problemy, by tę umiejętność odtworzyć i zaaplikować. Co można jeszcze zrobić, by wszyscy (albo zdecydowana większość uczniów) go zrozumiała i zapamiętała? Innymi słowami, co zrobić, żeby informacja ta była zaakceptowana przez kanał pamięci roboczej? Sięgnijmy dalej do badań w tym kierunku.

eprasa.pl 6365cfbfa2

Istota mechanizmu efektywnego przekazu informacji do pamięci roboczej

Clark i Mayer[2] stwierdzili, że przekazywanie impulsów do pamieci roboczej opiera się na dwóch zasadach:

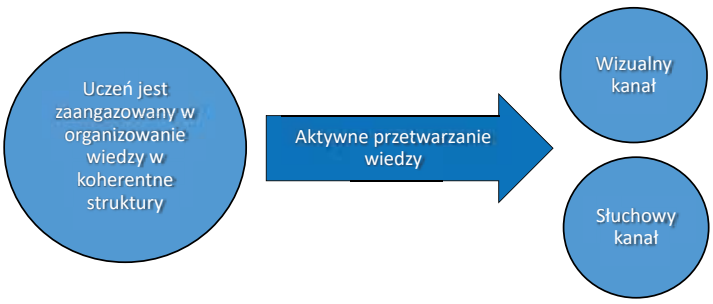
a) dualnym procesem przetwarzania informacji-uczniowie, jak również i dorośli posiadają podwójne kanały procesowania wiedzy na etapie pamięci roboczej: wizualny i słuchowy.
b) określoną szybkością absorbowania wiedzy – człowiek może przetworzyć tylko określoną porcję wiedzy w jednostce czasu.

Efekt graficznych reprezentacji. Według współczesnych badań, wizualny sposób przekazu wiedzy z wykorzystaniem graficznych reprezentacji jest najbardziej przyswajalny, ponieważ graficzne reprezentacje zmniejszają zapotrzebowanie na pamięć roboczą i dlatego informacja w formie graficznej ma dużo większe prawdobodobieństwo, by była dalej przekazana do pamięci długoterminowej i była zapamiętana. Ryc. 3 pokazuje jak wiedza jest rozdzielana w umyśle ucznia podczas aktywnego poznawania.

Przytoczone mechanizmy określają bardzo ogólne zasady, które wyjaśniają proces zrozumienia i zapamiętywanie wiedzy. Jednakże nawet z tych zasad wynikają pewne ogólne wnioski. Lekcje w formie monologów nauczyciela nie będą efektywne, ponieważ słowny przekaz nie jest tak efektywny jak obrazowy.

Nadrzędnym celem graficznych reprezentacji jest przetworzenie informacji na inny język; język obrazowy tak, by odciążyć kanał słuchowy. Powracając raz jeszcze do rzutu ukośnego, podanie uczniom różnych sytuacji, w których powinni najpierw określić układ współrzędnych i dopiero po tym znaleźć składowe początkowej prędkości, sformułować równania tego ruchu może okazać się bardziej efektywnym sposobem zapamiętania tego procesu.

Wyniki kilku badań przeprowadzone przez Moreno i Mayer[3] wykazały, że efektywność lekcji wzrasta, jeśli przekaz jakiekolwiek informacji jest zintegrowany z jej wizualnym odpowiednikiem. Słuchając tylko nauczyciela uczeń musi sobie najpierw wyobrazić te sytuacje, by je zrozumieć, co pociąga za sobą większe zapotrzebowanie na pamięć robocza. Nawet lekcje, na których nauczyciel napisze wzór na tablicy, na przykład $F = \frac{Gm_1m_2}{d^2}$, bez pokazania symulacji, które będą obrazować to prawo w formie wektorów sił lub omówienia podstaw matematycznych ich struktury, będą miały małe prawdopodobieństwo na jego zapamiętanie i zastosowanie, szczególnie do zadań nie obliczeniowych.



Ryc. 3. Dualny odbiór informacji: Wzorowany na podstawie Clark and Mayer.

Przedstawienie uczniom tych zależności w formie wykresów (siła w funkcji mas tych ciał lub siła w funkcji odległości pomiędzy środkami mas tych ciał) i nawiązanie do matematyki, i zależności wprost lub odwrotnie proporcjonalnych byłoby jeszcze bardziej wskazane. Łatwo przyswajalny obraz graficzny, podparty dialogiem nauczyciela z uczniami, będzie mieć zdecydowanie większe szanse na głębsze zrozumienie i zapamiętanie.

Powiązanie z poprzednimi tematami. Ważnym elementem w nauczaniu i zapamiętaniu wiedzy jest również odniesienie się do wiedzy, którą uczeń już posiada z poprzednich doświadczeń lub z poprzednich lekcji. Informacja, która ma związek z poprzednim doświadczeniem ucznia jest łatwiej zapamiętywana, szczególnie jeśli graficzny obraz lub proste doświadczenie może być wplecione w tok lekcji. Nawiązanie do tego co uczniowie już wiedzą lub doświadczyli w relacji do danego tematu tak, by nowy temat nie był oderwany od dotychczas zdobytej wiedzy przez uczniów ma duży wpływ na zapamiętanie.

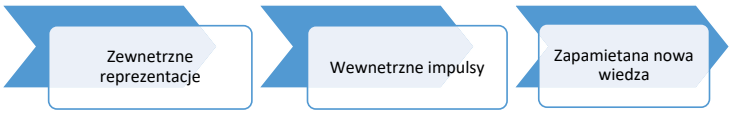
Ainsworth zbadał, że informacja, która nie jest powiązana z poprzednią wiedzą ucznia ma bardzo małe szanse na zapamiętanie. Innym czynnikiem są wskazówki, które możemy uczniom podsuwać, by łatwiej im było zapamiętać pewne fakty. Na przykład, przy wprowadzaniu zasad dynamiki Newtona warto wspomnieć, że kiedy wypadkowa siła działających na ciało jest zero, to opis położenia ciała jest podparty wcześniej poznanymi wzorami na ruch jednostajny. Podobnie jak wykorzystuje się związki matematyczne dla ruchu jednostajnie przyspieszonego, w przypadku, kiedy wypadkowa nie jest równa zero. Dla nauczycieli związki te stanowią fakty oczywiste, ale dla ucznia, który te związki dopiero poznaje związki te nie są nowe i abstrakcyjne.

Stopniowanie wiedzy. Innym i może ważniejszym elementem jest stopniowanie wiedzy (*scaffolding*). Jakkolwiek graficzne reprezentacje odciążają pamięć słuchową i tym samym zmniejszą zapotrzebowanie na pamięć roboczą, stopniowanie wiedzy pozwala na obniżenie *szybkości* zapotrzebowania na pamięć roboczą: stopniowanie, a więc *rozciągnięcie w czasie przekazu* informacji przez podzielenie zagadnienia na etapy tak aby czas na przyswojenie wiedzy się wydłużył i zastosowanie graficznych obrazów wpływa na zmniejszenie tempa jej zapotrzebowania. Na przykład, podczas wprowadzania zasady zachowania pędu dla układu ciał, warto by było najpierw przedyskutować z uczniami, jak zdefiniowany jest system ciał w fizyce i jak policzyć jego całkowity pęd nim zasada zachowania pędu będzie wprowadzona. Przykładów podobnych jest dużo więcej w fizyce i warto, by podczas przygotowania się do uczenia nowego zagadnienia mieć to również na uwadze.

Czym jest wiedza zapamiętana?

Kaput[4] podzielił wiedzę na impulsy zewnętrzne i wewnętrze. W procesie zapamiętania, impulsy zewnętrzne są przetwarzane na impulsy wewnętrze. Zewnętrzne impulsy to wszystko co może być określone jako formy przekazu (graficzne, werbalne, zapachowe itp.). Ponieważ impulsy zewnętrzne przetwarzane są wewnętrzne zgodnie z indy-

eprasa.pl 6365cfbfa2



Ryc. 3 Proces efektywnego zapamiętania.

widualną percepcją, forma impulsów zapamiętanych lub bodźce, które tą pamięć tworzą są bardzo indywidualne.

Rozumienie danego zagadnienia na różny sposób nie jest czymś negatywnym, jeśli tylko meritum tego zagadnienia jest niezachwiane. Na przykład, niektórzy uczniowie rozumieją ruch jednostajny jako ten, który przedstawia położenie ciała jako linie prostą, inni rozumieją ten ruch jako ten, którego wykresem prędkości jest linia pozioma (z zerowym współczynnikiem kierunkowym). Obydwie interpretacje są poprawne. Jeśli uczeń potrafi przekształcić jedną interpretację w inną powiemy, że ten uczeń ma adekwatny poziom koncepcyjnego rozumienia istoty ruchu jednostajnego.

Interpretowanie zjawisk fizycznych w wieloraki, jednak spójny merytorycznie sposób jest stosowany i szeroko propagowany w USA. Wewnętrzne impulsy nie są obserwowalne. Hochreiter i Schmidhuber[5] zdefiniowali wewnętrzne impulsy jako *doświadczania podczas uczenia się*, które każdy z nas buduje *na swój sposób*. Więcej, wewnętrzne impulsy są modyfikowane przez cały czas życia poprzez odziaływanie ze środowiskiem i z nowymi impulsami wiedzy. W procesie uczenia się (zobacz ryc. 3.), wewnętrzne impulsy są inicjowane przez zewnętrzne impulsy, a te budowane są tylko wtedy, kiedy uczeń znajdzie w tym zagadnieniu logikę i sens.

Siła zakodowanych impulsów zewnętrznych ma wpływ na czas ich zapamiętania. Hiebert i Carpenter[6] stwierdzili, że rozumienie polega za ciągłym utrzymaniu polaczenia pomiędzy zewnętrznymi w wewnętrznymi impulsami. Pójdźmy dalej: wewnętrzne impulsy są przekształcane na zewnętrzne w procesie odtwarzania wiedzy. A jak zdefiniowane jest czytanie notatek w kontekście impulsów? Felder[7] stwierdził, że umysł ludzki przetwarza czytany tekst na mówione słowa, tak więc czytanie podręcznika będzie mieć taki sam wpływ na rozumienie i zapamiętanie wiedzy, jak gdybyśmy słuchali wykładowcy.

Podsumowanie

Na zrozumienie i zapamiętanie zagadnienia ma wpływ z pewnością wiele innych czynników niż poruszone w tym artykule. Jednym z nich może być np. atmosfera na lekcji. Kreowanie sytuacji, na których uczeń jest skoncentrowany, ale kiedy czuje się swobodnie ma duży wpływ na stopień przyswajania wiedzy. Lekcje, które są intelektualnie stymulujące są postrzegane jako jedne z ważniejszych, które będą wspomagać rozumienie i zapamiętanie. Innym czynnikiem jest stopień przygotowania merytorycznego i pedagogicznego nauczyciela, jak również personalne atrybuty jak pasja uczenia, umiejętność pracy z młodzieżą i umiejętność zainteresowania.

Czy metody uczenia muszą być dopasowane do specyfiki zagadnienia, które chcemy uczniom wytłumaczyć? Wydaje się, że niekoniecznie. Postęp technologiczny zmienia poczucie odbierania bodźców zewnętrznych i ich interpretacje. Młodzież się zmienia i zmienia się jej interakcja ze środowiskiem. Metody uczenia powinny więc odpowiadać nowoczesnym zaleceniom, które podparte są nowoczesnymi badaniami, a forma przekazu zagadnienia powinna być tak zmodyfikowana, aby umożliwiła zastosowanie tych metod.

LITERATURA

[1] Paas F., Renkl, A., & Sweller, J., Cognitive load theory and instructional design: Recent developments. Educational Psychologist, 38(1)/2003, 1-4.
[2] Clark R. C., & Mayer R. E., E-learning and the science of instruction: Proven guidelines for consumers and designers of multimedia learning. John Wiley & Sons, 2016
[3] Moreno R., & Mayer, R. E, Cognitive principles of multimedia learning: The role of modality and contiguity. Journal of educational psychology, 91(2)/1999, 358.
[4] Kaput J., Supporting Concrete Visual Thinking in Multiplicative Reasoning: Difficulties and Opportunities. Focus on Learning Problems in Mathematics, 11/1989, 35-47.
[5] Hochreiter S., & Schmidhuber J., Long short-term memory. Neural Computation, 9(8)/1997, 1735-1780.
[6] Hiebert J., & Carpenter T., Learning and teaching with understanding." Handbook of research on mathematics teaching and learning: A project of the National Council of Teachers of Mathematics, 65-97/1992.
[7] Felder R. M., & Henriques E. R., Learning and teaching styles in foreign and second language education. Foreign language annals, 28(1)/1995, 21-31.

W następnym numerze

Cztery i pół stany skupienia. Część II: gazy.

Grzegorz Karwasz, Waldemar Krychowiak

„Cztery są więc, zdaniem Empedoklesa, żywioły - ziemia, woda, powietrze i ogień" pisał Arystoteles, zacytowawszy wcześniej Anaksymena i Anaksagorasa (albo odwrotnie). Nie trzeba więc pamiętać, co uważał Anaksagoras a co ten drugi, bo po trzystu latach po nich (tzw. szkoła jońska filozofii przyrody) sprawozdał to Filozof. Ciekawe jest natomiast, że cztery „żywioły" pojawiły się nie w „Fizyce", ale w „Metafizyce" (Ks. I, 849a, 10-12).

Gazów dotyczy kilka ważnych, a często zapomnianych praw. Waga (i stopień trudności) tych praw jest różny: zaznaczamy * wiedzę zasadniczą, również na poziomie szkolnym; przez ** wiedzę, np. z włoskich podręczników licealnych (trudniejszych niż w Polsce) i przez *** wiedzę, której, może się zdarzyć, nie zna nawet student fizyki.

eprasa.pl 6365cfbfa2

Foton – cóż to takiego?

(Miniatura dydaktyczna)

Waldemar **Reńda**

W encyklopedii[1] czytamy: foton – kwant pola elektromagnetycznego; cząstka elementarna o zerowej masie spoczynkowej poruszająca się z prędkością światła i biorąca udział jedynie w oddziaływaniach elektromagnetycznych. Jego energia pęd i częstotliwość związane są wzorami $E = h\nu$, $p = E/c$. Foton nie ma ładunku elektrycznego ani momentu magnetycznego. Jego spin jest całkowity, a zatem foton podlega statystyce Bosego-Einsteina.[2]

Na lekcjach fizyki mówi się uczniom, że światło jest falą należącą do rodziny fal elektromagnetycznych, której członkowie różnią się głównie długością owych fal.[3] Podkreśla się też przede wszystkim podobieństwa, a niewiele mówi się o różnicach. A są one na tyle liczne i ważne, iż ową rodzinę należałoby podzielić na dwie podrodziny: na elektromagnetyczne fale radiowe i fotony.

Zauważmy, że nawet w nazewnictwie występują różnice, bo fale radiowe to zawsze **fale**: fale długie, średnie, krótkie, czy ultrakrótkie, ale w przypadku fotonów mówi się często o **promieniowaniu**. Jest więc promieniowanie podczerwone, widzialne, ultrafioletowe, rentgenowskie czy gamma. Mówi się wprawdzie o świetle jako zjawisku falowym, ale głównie w optyce geometrycznej. Natomiast w optyce fizycznej częściej posługujemy się nazwą „foton".

Dlaczego jednak obie podrodziny zaliczanie są do tej samej rodziny fal elektromagnetycznych? Decyduje o tym fakt, że są one polem elektromagnetycznym, że poruszają się w próżni prostoliniowo z tą samą prędkością 300 tysięcy km/s, że można je opisać, używając tych samych wielkości fizycznych jak długość i częstotliwość oraz że podlegają tym samym zjawiskom jak odbicie, załamanie, interferencja czy polaryzacja. Ta ostatnia cecha informuje nas dodatkowo, że we wszystkich tych przypadkach mamy do czynienia z falą poprzeczną.

Czym jest fala elektromagnetyczna i dlaczego używamy tu nazwę „fala"? Fala elektromagnetyczna to przemieszczające się zmienne pole elektryczne i magnetyczne. Cechą charakterystyczną tych zmian jest to, że odbywają się one z określoną częstotliwością, przy czym owe zmiany dotyczą natężenia tych pól. W przypadku fali o określonej częstotliwości, wartości wektorów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, badanych wzdłuż promienia ich rozchodzenia się, można – podobnie jak dla fali mechanicznej – opisać z pomocą funkcji sinus.

Dlaczego jednak proponuję podział na owe „podrodziny"?

O ile w przypadku fal radiowych zachodzą pewne podobieństwa np. do fali kulistej emitowanej przez drgający kamerton, to w przypadku fotonów brak tej cechy. Mamy tu bowiem do czynienia ze swoistą „zgęstką" pola elektromagnetycznego emitowaną kierunkowo. Ponadto fale radiowe emitowane są na ogół w sposób ciągły i rozchodzą się w przestrzeni podobnie, jak wspomniana fala dźwiękowa wytwarzana przez kamerton.[4] Fala radiowa – podobnie jak wspomniana wyżej fala dźwiękowa – może być równocześnie odbierana przez wielu „odbiorców". Natomiast „odbiorcą" fotonu jest zwykle jeden atom lub pojedyncza cząsteczka. W przypadku fali radiowej przekaz energii odbywa się pomiędzy jednym nadajnikiem a wieloma odbiorcami. Natomiast w przypadku fotonu mamy do czynienia z oddziaływaniem elektromagnetycznym pomiędzy dwoma obiektami – atomami lub cząsteczkami. Dodam, że foton jest cząstką, która dotąd istnieje, dopóki nie zostanie pochłonięta.[5] Może więc przemierzać dowolnie duże odległości. Natomiast natężenie fali radiowej maleje do zera wraz z odległością.

Przyjrzyjmy się bliżej źródłom fal radiowych oraz fotonów.

Źródłem fal radiowych jest antena (ew. klistron dla mikrofal), w której – na ogół – w sposób ciągły płynie prąd sinusoidalnie przemienny,[6] a w przypadku fotonów jest to jednorazowy akt emisji, spowodowany np. przeskokiem elektronu w konkretnym atomie i jest ściśle związany ze skwantowaniem poziomów energetycznych tegoż atomu lub cząsteczki.[7] Nieco odmienny charakter ma emisja fotonów gamma[8] oraz tworzenie się promieni rentgenowskich. Te ostatnie powstają w wyniku hamowaniem elektronów w materiale antykatody. Z tym, że i tu występuje promieniowanie charakterystyczne związane z przejściem elektronu pomiędzy poszczególnymi warstwami elektronów w danym atomie.

Jak widać, istnieją zasadnicze różnice w tym, jak powstają poszczególne rodzaje promieniowania elektromagnetycznego.[9] Różnice dotyczą również ich właściwości.

---

[1] Tekst zaczerpnięty z „Ilustrowanej encyklopedii dla wszystkich. Fizyka" pod redakcją A. Januszajtisa i J. Langera, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1987, s. 88.

[2] Cząstki podlegające statystyce Bosego-Einsteina. Oznacza to, że nie obowiązuje dla nich zasada Pauli'ego.

[3] Ponieważ będę zajmował się wyłącznie falami rozchodzącymi się w próżni lub powietrzu, zatem poprzestanę jedynie przy tej cesze owych fal.

[4] Z tym, że fala dźwiękowa jest falą podłużną, ale w tym przypadku chodzi mi o podobieństwo **kształtu czoła** tych fal.

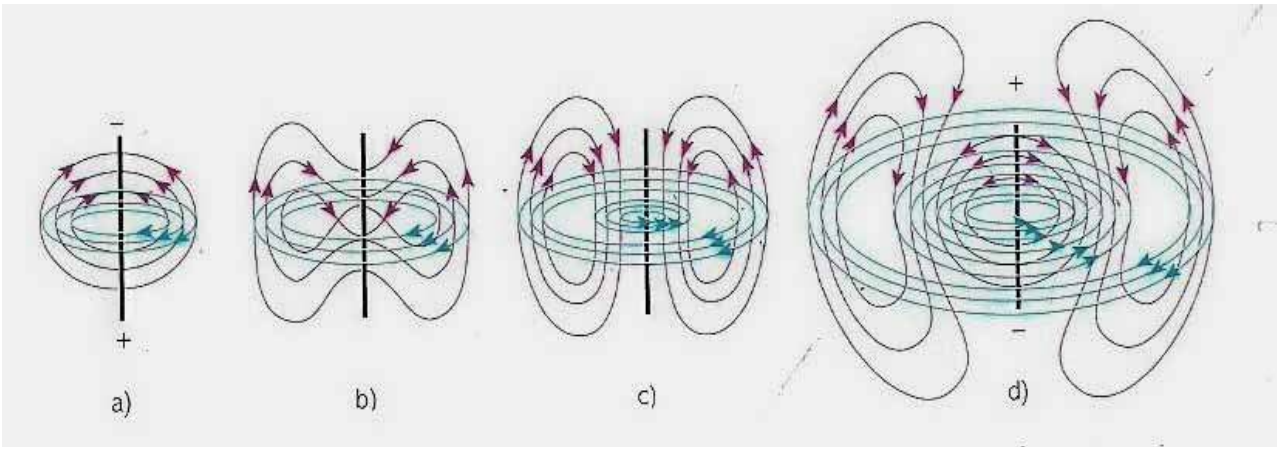
[5] Z STW wynika, że jest cząstką bezczasową.

[6] Dla częstotliwości nośnej.

[7] W przypadku cząsteczki skwantowanie dotyczy energii rotacji i oscylacji. Zmiana tej energii wywołuje emisję promieniowania w zakresie podczerwieni. Tworzą się wówczas widma pasmowe.

[8] Fotony gamma powstają m.in. w wyniku przemieszczania się nukleonów w jądrze po emisji cząstki alfa, lub np. w procesie anihilacji elektronów.

eprasa.pl 6365cfbfa2



Jak już wspomniałem, fale radiowe mogą ulegać tym samym zjawiskom, co fale mechaniczne. Z tym, że fale mechaniczne i radiowe mogą interferować niejako „same ze sobą”. Natomiast w przypadku fotonów możliwość ta jest bardzo wątpliwa. Nie wiemy wprawdzie, przez którą szczelinę siatki dyfrakcyjnej przeszedł dany foton, ale wiemy, do którego punktu (atomu lub cząsteczki) ekranu dotarł.[10] Chcąc otrzymać widmo interferencyjne, musimy zatem użyć strumienia fotonów. Tak też jest w przypadku interferencji elektronów. Inne zjawiska, jak np. fotoemisja czy zjawisko Compton dają się opisywać wyłącznie poprzez przyjęcie korpuskularnych właściwości fotonów. Tu bowiem foton zachowuje się jak klasyczna cząstka elementarna.[11] Wprawdzie nie posiada on masy, ale możemy przypisać mu pęd, a nawet spin.

Różnice między falą radiową a fotonami są na tyle duże, że nie można o nich zapominać nawet wówczas, gdy emitowane są fale o tej samej długości. Dotyczy to najkrótszych mikrofal, które pokrywają się z fotonami z głębokiej podczerwieni. Wprawdzie podobnie oddziałują z materią, wywołując z reguły wzrost temperatury ciała poprzez zwiększenie energii kinetycznej ruchu atomów lub cząsteczek, ale inaczej są emitowane: mikrofale, które wytwarza swoista antena nadawcza, jaką jest klistron. Natomiast fotony podczerwieni powstają w wyniku kwantowej zmiany częstotliwości drgań atomów w cząsteczce lub kwantowej zmiany częstotliwości jej obrotów.

Mówi się wprawdzie, że właściwości korpuskularne fotonów są tym wyraźniejsze, im mają one krótszą falę. I odwrotnie: ich efekt korpuskularny maleje wraz ze wzrostem długości owych fal. Nie można jednak przyjmować, że antena radiowa emituje fotony, mimo że teoretycznie można obliczyć energię takiego fotonu. Radiowej fali elektromagnetycznej nie można też przypisać ani pędu ani spinu.

A teraz słów parę o odbiorze fal elektromagnetycznych.

Odbiornikiem elektromagnetycznych fal radiowych jest antena. Jest to na przykład pręt metalowy, w którym pole magnetyczne fali nośnej wzbudza prąd indukcyjny o częstotliwości równej częstotliwości nośnej tej fali. Odbiornikiem światła bywa np. oko lub klisza fotograficzna. Z tym, że oko reaguje na składową elektryczną fotonów, która wywołuje reakcję w cząsteczkach fuksyny. Podobnie jest w kliszy fotograficznej, w której foton zapoczątkowuje reakcję fotochemiczną w cząsteczce związku światłoczułego – np. bromku srebra.

Na koniec przytoczę prawa Maxwella, opisujące zmiany pola elektrycznego i magnetycznego w fali elektromagnetycznej przemieszczającej się w próżni, gdyż bez nich trudno jest w pełni zrozumieć mechanizm powstawania i rozprzestrzeniania się tej fali. Oto one: rot $\boldsymbol{E} = -\mu_o\, d\boldsymbol{H}/dt$, rot $\boldsymbol{H} = \varepsilon_o\, d\boldsymbol{E}/dt$, div $E = 0$, div $H = 0$. Zgodnie z powyższym, linie pola elektrycznego i magnetyczne w biegnącej faki radiowej można zilustrować nastpująco (patrz rysunek).[12]

Dodam, że w opisie struktury fali elektromagnetycznej biegnącej w ośrodku jednorodnym pokutuje wiele uproszczeń niezgodnych z rzeczywistością. Bywa ona bowiem przedstawiana jako łańcuszek wzajemnie splecionych ogniw, co jest nieporozumieniem. Bywa też ilustrowana jedynie jako splecione i wzajemnie prostopadłe dwie sinusoidy. Trzeba jednak pamiętać, że owe sinusoidy dotyczą wyłącznie **wartości** wektorów $\boldsymbol{E}$ i $\boldsymbol{H}$ (lub $\boldsymbol{D}$ i $\boldsymbol{B}$)[13], a iloczyn wektorowy wektorów $\boldsymbol{E}$ i $\boldsymbol{H}$ jest wektorem[14] zgodnym z wektorem prędkości przemieszczania się czoła fali elektromagnetycznej i że owe trzy wektory tworzą trójkę prawoskrętną.

Czy tak „wygląda” foton? Wątpię! I jest to kolejny dowód na istnienie znaczących różnic pomiędzy falą radiową a fotonem. I na tyle dużych, że zamiast mówić o falach elektromagnetycznych wolałbym określenie bardziej ogólne, a mianowicie *promieniowanie elektromagnetyczne*.

Waldemar Reńda,
Olkusz

[9] Wg mnie jest to lepsza nazwa dla całej rodziny fal elektromagnetycznych.

[10] Nie oznacza to, że przeszedł przez wiele szczelin równocześnie. Aby dowiedzieć się, przez którą szczelinę przeszedł, należałoby tam właśnie umieścić odbiornik. Ale wówczas ów foton zostałby pochłonięty i nie mógłby uczestniczyć w tworzeniu obrazu interferencyjnego.

[11] Jest też zwykle umieszczany w spisie owych cząstek.

[12] Zob.: *Nowa Encyklopedia Powszechna,* PWN, tom 2., str. 315. Rysunek przedstawia w sposób przybliżonyrozkład linii pól elektrycznego (czerwone) i magnetycznego (zielone) powstających wokół dipola anteny nadawczej. Problemem jest tu jedynie związanie natężeń owych pól z gęstością linii.

[13] Pogrubienie oznacza wektor.

[14] Wektor Poyntinga.

eprasa.pl 6365cfbfa2

Badanie właściwości fizyko-chemicznych meteorytu za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego

Marcin **Wesołowski**, Wioletta **Kondziołka**

Poprzez meteoryt należy rozumieć fragment obcego ciała niebieskiego np. meteoroidu, asteroidy lub komety, które upadło na powierzchnię masywniejszego ciała niebieskiego (planety, księżyca) w postaci ciała stałego. Podczas wejścia danego obiektu w atmosferę np. Ziemi pod wpływem tarcia zachodzącego pomiędzy powierzchnią meteorytu a cząsteczkami powietrza jego powierzchnia rozgrzewa się do wysokiej temperatury. Pewna część jego energii kinetycznej ulega transformacji w energię jonizacji i wzbudzenia atomów powietrza. Wzbudzone cząsteczki natychmiast wypromieniowują uzyskaną energię – co możemy zaobserwować w postaci powstałej na niebie smugi.

Znaczna większość meteoroidów kończy swoje „życie" spalając się całkowicie w atmosferze. Prędkość meteoroidu, który wpadł w atmosferę Ziemi jest zależna od jego własnej prędkości i prędkości Ziemi w jej ruchu orbitalnym wokół Słońca, która wynosi około 30 km/s. Dla brył materii poruszających się po orbitach parabolicznych, a więc zbliżających się do Słońca z bardzo odległych rejonów przestrzeni kosmicznej wynosi ona w pobliżu Ziemi około 42 km/s. Dlatego szybkość meteoroidu lecącego na spotkanie Ziemi wynosi około 72 km/s, a szybkość meteoroidu, doganiającego Ziemię wynosi tylko 12 km/s.

Dodatkowo należy zaznaczyć, że pewien wkład do prędkości ruchu meteoroidu przez atmosferę ma także prędkość ruchu obrotowego Ziemi. Gdy meteoroidem jest stosunkowo duża bryła materii, to w trakcie swojego przelotu przez atmosferę nie ulegnie ona całkowitemu spaleniu, lecz dotrze do powierzchni Ziemi. Taka bryła materii kometarnej posiada zazwyczaj charakterystyczny wygląd – przypominający żużel hutniczy. Warto w tym miejscu odnotować, że największe znalezione okazy meteorytów mają masę nawet kilku ton.

Powszechnie przyjmuje się, że dwa mechanizmy odpowiedzialne są za powstawanie meteorytów:

1. Kolizje zachodzące w wewnętrznym Układzie Słonecznym,
2. Aktywność sublimacyjna komet (zjawisko gejzerów kometarnych), a także ich możliwy rozpad.

W wyniku kolizji zachodzących w pasie asteroid powstałe okruchy materii zaczynają poruszać się po własnych orbitach. Zauważmy, że tak się dzieje tylko z tymi meteoroidami, które posiadają wystarczającą dużą energie kinetyczną. W przypadku najdrobniejszych okruchów dochodzi do ich upadku na macierzysty obiekt (planetoidę). W ekstremalnie silnych kolizjach może dojść nawet do rozbicia całej planetoidy.

Niekiedy może dochodzić do niezwykle intersujących sytuacji, które związane są z ponownym łączeniem się rozbitej materii w jedno nowe ciało. Taki kosmiczny spektakl powoduje, że w strukturze takiego obiektu znajdują się liczne puste przestrzenie (pory), a także różnorodna materia kosmiczna. Przedstawione w dużym skrócie przeobrażania zarówno planetoid i meteoroidów powodują, że meteoryty, które możemy badać mają różnorodny skład chemiczny i niezwykle intersującą budowę.

Drugim mechanizmem odpowiedzianym za powstawanie meteorytów jest zjawisko związane z aktywnością emisyjną komet, które może zachodzić zarówno z powierzchni (szczególnie w przypadku komet, które po raz pierwszy zbliżają się do Słońca), jak i z ich wnętrza poprzez gejzery. Proces aktywności komet („brudnych kul lodowych") związany jest ściśle z jej położeniem w Układzie Słonecznym.

Jeżeli kometa znajduje się stosunkowo daleko od Słońca to jej jądro nie przejawia praktyczne żadnej aktywności. Podczas zbliżania się do Słońca jądro komety zaczyna się stopniowo ogrzewać. Wówczas rozpoczyna się zjawisko sublimacji lodu kometarnego - głównego ich budulca. Ważne jest to, że każdy rodzaj lodu kometarnego sublimuje w ściśle określonej kolejności – od najbardziej do najmniej lotnych związków chemicznych. Ponadto jądra kometarne pokryte są tzw. płaszczem kometarnym, który znacząco utrudnia sublimację danego lodu. Mimo tego zachowanie komet, a w szczególności aktywność sublimacyjna jest jednym z ciekawszych zjawisk związanych z tymi ciałami niebieskimi.

Analizując bogaty materiał obserwacyjny możemy jasno stwierdzić, że tylko niewielki ułamek całkowitej powierzchni jądra komety jest aktywny sublimacyjne. W wyniku tego zjawiska do atmosfery komety są wyrzucane ziarna lodu i pyłu, których wymiary w istotny sposób zależą od: promienia jądra komety, tempa sublimacji danego lodu kometarnego, gęstości materii kometarnej, a także temperatury na powierzchni i pod powierzchnią jądra, która jest konsekwencją odległości heliocentrycznej. Taki mechanizm w literaturze określany jest mianem spokojnej sublimacji. W wyniku tego procesu wymiary ziaren, które są emitowane wynoszą średnio około kilku centymetrów.

Drugim mechanizmem, który jest odpowiedzialny za wyrzucanie odłamków materii z wnętrza komety jest zjawisko gejzerów kometarnych. W tym przypadku ziarna mogą mieć wartość od kilku a nawet do kilkunastu centymetrów. Warto dodać, że zjawisko to zostało potwierdzone podczas misji kosmicznych do komet: 103P/Hartley (EPOXI w 2011 roku) lub 67P/Churyumov–Gerasimenko (Rosetta w latach 2014–2015). Zauważmy, że przedstawione powyżej dwa mechanizmy emisji materii z powierzchni komet zostały szeroko przedyskutowane w literaturze.

eprasa.pl 6365cfbfa2

Głównym budulcem, jeśli chodzi o komety jest lód wodny, który spaja poszczególne fragmenty jądra. W wyniku intensywnej sublimacji szacuje się, że kometa za każdym powrotem w pobliże swojego peryhelium traci około 0.5% swojej masy. W ten sposób po dostatecznie dużej ilości przejść przez peryhelium jądro pozbawione jest znacznej ilości lodów, które spajają poszczególne struktury komety.

W końcowym rezultacie po pewnym czasie (po dostatecznie dużej liczbie obiegów) kometa rozpada się na małe fragmenty. Siły perturbacyjne pochodzące od planet rozkładają gruz kometarny wzdłuż pierwotnej orbity komety. Jeżeli eliptyczna orbita komety przecina orbitę Ziemi lub przebiega dostatecznie blisko niej, to wtedy regularnie w określonych porach roku możemy obserwować roje meteoroidów. Dotychczas nie zidentyfikowano meteorytu, którego pochodzenie byłoby związane z kometą. Dodatkowo warto by pochylić się nad następującym pytaniem: czy materiał komety przetrwałby przejście przez naszą atmosferę?

Ponadto jest całkiem możliwe, że niektóre meteoryty spadające na Ziemię pochodzą z innego układu planetarnego. Zaburzenia w ruchu małych ciał niebieskich mogą być spowodowane oddziaływaniem grawitacyjnym z dużymi planetami. Rezultatem tego procesu może być wyrzucenie małego ciała poza dany układ planetarny, a nawet dotarcie do Ziemi. Jednak nie ma jednoznacznych dowodów na to, że którykolwiek ze znanych meteorytów pochodzi z innego układu planetarnego.

Pomimo powyższych trudności warto jednak szczegółowo analizować i badać strukturę meteorytu, ponieważ znajdujemy w nich mikroskopijne cząstki stałe powstałe przed powstaniem naszego Układu Słonecznego. Należą do nich kryształy diamentowe, węglik krzemu i inne cząstki powstałe w mgławicy przed powstaniem naszego układu planetarnego.

Podkreślmy jeszcze raz, że ogromna większość znalezionych meteorytów pochodzi z kolizji między asteroidami. Pochodzenie innych meteorytów jest stosunkowo trudne do ustalenia. Wynika to z faktu, że niewielka ich część to meteoryty pochodzące z Marsa lub naszego Księżyca. W sprzyjających okolicznościach obiekty te możemy badać, ale to już zależy przede wszystkim od ich masy.

Meteoryt Morasko

Jednym z najbardziej znanych pomników przyrody, który związany jest z ochroną miejsca upadku i kraterów uderzeniowych jest rezerwat przyrody Meteoryt Morasko (utworzono go 24 maja 1976 roku). Obecnie znajduje się on w północnej części Poznania, a dawniej we wsi Morasko – stąd też wynika jego nazwa. Zaznaczmy, że nazwa meteoryt Morasko dotyczy łącznej grupy wszystkich okazów, które są wynikiem rozpadu pierwotnego meteorytu w atmosferze. Fragmenty te były znajdowane w okolicy dawnej wsi Morasko. Meteoryt ten został odkryty 12 listopada 1914 roku podczas prowadzenia umocnień wojskowych na Morasku. Z głębokości około 0.5 metra gruntów rolnych wykopano bryłę żelaza o masie ponad 77 kilogramów.

Foto. 1. Fragment meteorytu, który został odnaleziony w rezerwacie przyrody Meteoryt Morasko (źródło: https://pl.wikipedia.org/wiki/Morasko_(meteoryt)).

Na podstawie badań skorupy metodą termoluminescencyjną określono, że meteoryt ten spadł pomiędzy 4100 a 2700 rokiem p.n.e. Ponadto analiza składu chemicznego wykazała, że najobfitszymi pierwiastkami są: żelazo (93%), nikiel (6.56%) oraz kobalt (0.46%).

Klasyfikacja meteorytów

Generalnie rzecz biorąc meteoryty, które są odnajdywane na Ziemi mają różne wymiary – od małych okruchów do dużych bloków o średnicy niekiedy przekraczającej kilka metrów. Meteoryty tradycyjnie są klasyfikowane na podstawie ich składu chemicznego. Wyróżniamy tu następujące grupy:

- meteoryty żelazne – syderyty,
- meteoryty żelazno-kamienne – syderolit, które tworzą się między metalicznym jądrem a krzemianową powłoką planetoidy,
- meteoryty kamienne – aerolity:
- Chondryty, które zwierają do 10% krystalicznego żelaza,
- Achondryty, które zwierają około 1% krystalicznego żelaza, co więcej do złudzenia przypominające bazalty.

Mikroskopia elektronowa

Mikroskopia elektronowa jest współczesną techniką badawczą wykorzystywaną między innymi do badania

Foto. 2. Przykładowa fotografia meteorytu typu Chondryty węglisty (Foto. NASA).

eprasa.pl 6365cfbfa2

Foto. 3. Marsjański meteoryt – typowy meteoryt kamienny (Foto. NASA).

minerałów, skał pochodzenia zarówno ziemskiego jak i pozaziemskiego. Metoda ta pozwala określić skład chemiczny, mineralny oraz mikrostrukturę badanej próbki. W celu analizy składu chemicznego badanego materiału rejestruje się promieniowanie rentgenowskie które generowane jest przez wiązkę elektronów w czasie skanowania powierzchni próbki.

Energia kwantów wykorzystywanego promieniowania jest ściśle związana z rodzajem emitujących pierwiastków. Ponadto natężenie linii widma rentgenowskiego związane jest z ilością pierwiastków, które zostały zidentyfikowane w badanym fragmencie próbki. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że oddziaływanie wiązki elektronów z badanym materiałem podczas skanowania prowadzi nie tylko do emisji promieni rentgenowski, ale także do wybijania elektronów wtórnych, emisji światła widzialnego, generacji elektronów elastycznie wstecznie rozproszonych oraz innych mniej znaczących procesów.

Generalnie SEM służy do wykonywania fotografii danego obszaru badanej próbki. Natomiast za identyfikację składu chemicznego odpowiada analizator EDS. Umożliwia on także analizę jakościową i ilościową zawartości poszczególnych pierwiastków znajdujących się w badanym obszarze meteorytu. Co więcej umożliwia on identyfikacje linii emisyjnych wraz z ich energią, która odpowiada poszczególnym przejściom pomiędzy poziomami energetycznymi danego pierwiastka. W rezultacie otrzymujemy widmo - będące zależnością liczby zliczeń w funkcji energii promieniowania. Wartość energii promieniowania pozwala na identyfikację poszczególnych pierwiastków, które występują w próbce. Natomiast intensywność, czyli wysokość pików związana jest z analizą ilościową.

Metodologia badań - wyniki

Badanie struktury meteorytu, składu chemicznego oraz identyfikacja poszczególnych linii emisyjnych danego związku chemiczne wykonano wykorzystując skaningowy mikroskop elektronowy TESCAN VEGA 3 (SEM). Dodatkowo nasz SEM został wyposażony w mikroanalizator rentgenowski BRUKER NANO X-FLASH 410-M. Podczas wykonywania pomiarów stosowano napięcie przyspieszające 30kV. Dla próbki meteorytu wykonano serię fotografii (obrazy panoramiczne) z każdej możliwej jego strony. Łącznie około pięciuset zdjęć w różnych powiększeniach po kilka (kilkanaście) miejsc dla każdej z próbek. W następnym kroku wykonano analizę jakościową i ilościową zawartości poszczególnych pierwiastków w badanej próbce meteorytu.

Ponadto dzięki zastosowaniu specjalistycznego oprogramowania (dołączonego do SEM) mogliśmy w badaniach uwzględnić wpływ błędu pomiarowego dla każdego identyfikowanego pierwiastka z osobna. Badanie zostało przeprowadzone dla próbki meteorytu o wymiarach: (8.13×5.31×3.62) mm±0.01mm. Podczas wykonywania pomiarów w celu analizy błędów pomiarowych została zastosowana reguła 3 sigma. Reguła ta jest ściśle skorelowana z odchyleniem standardowym oraz rozkładem normalnym. Bazując na wartościach rozkładu normalnego możemy stwierdzić, że w naszym przypadku 99.7% obserwacji znajduje się w zakresie pomiędzy ± 3 odchylenia standardowe od średniej wartości danego pomiaru.

W dalszej części zostały przedstawione wybrane (najciekawsze) fotografie poszczególnych struktur meteorytu oraz ich analiza pod kątem zwartości poszczególnych pierwiastków chemicznych. Przedstawione wyniki dotyczą widoku z góry badanej próbki, które będą prezentowane w różnej skali.

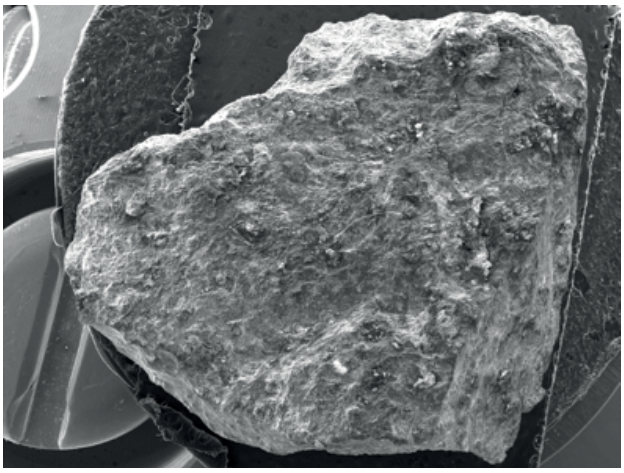
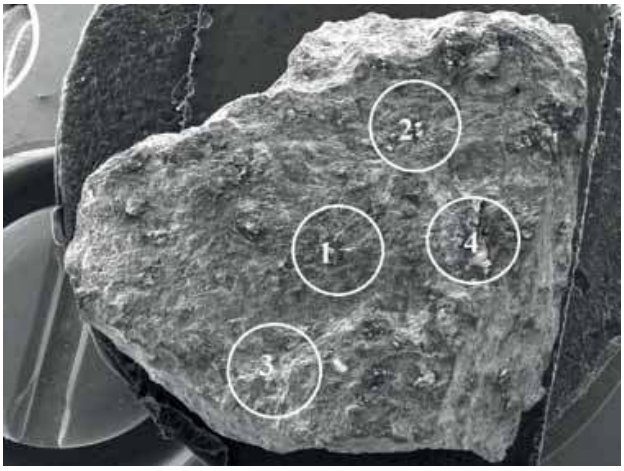


Foto. 4. Fotografia próbki meteorytu, która została wykonana za pomocą SEM – widok z góry.



Rys. 1. Mapa wybranych punktów, dla których wykonano szczegółową ich analizę.

eprasa.pl 6365cfbfa2

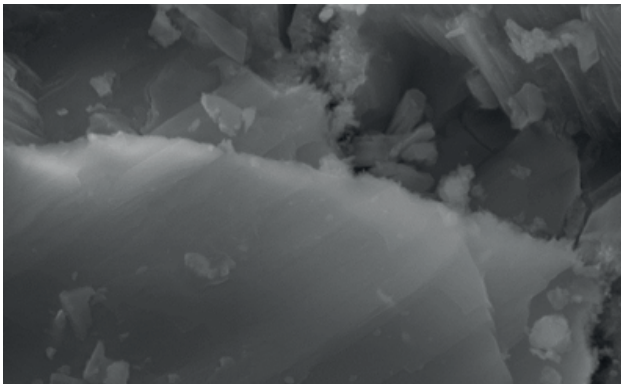
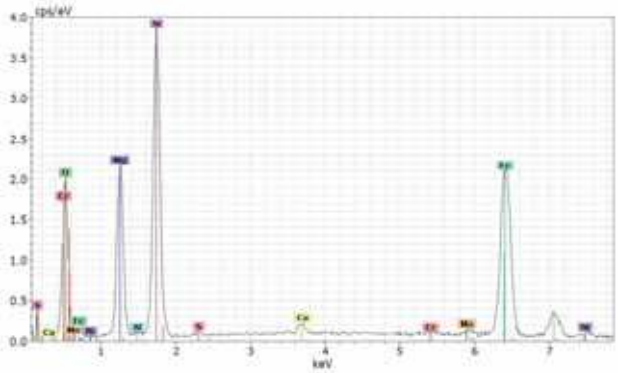


Foto. 5. Widok dla punktu 1 – fotografia wykonana dla poziomego wymiaru obrazu 16 µm.



Rys. 2. Widmo składu chemicznego w oparciu o Foto. 5

Tabela 1. Procentowa zwartość poszczególnych pierwiastków na podstawie Foto. 5 wraz z analizą błędów pomiarowych.

Pierwiastek	Liczba atomowa	Stężenie masowe [%]	Błąd pomiaru [%]
Tlenki	(*)	40.41	17.97
Magnez	12	17.47	3.22
Aluminium	13	0.45	0.21
Krzem	14	23.64	3.31
Siarka	16	0.18	0.13
Wapń	20	0.48	0.15
Mangan	25	0.37	0.14
Żelazo	26	16.37	1.38
Nikiel	28	0.53	0.17

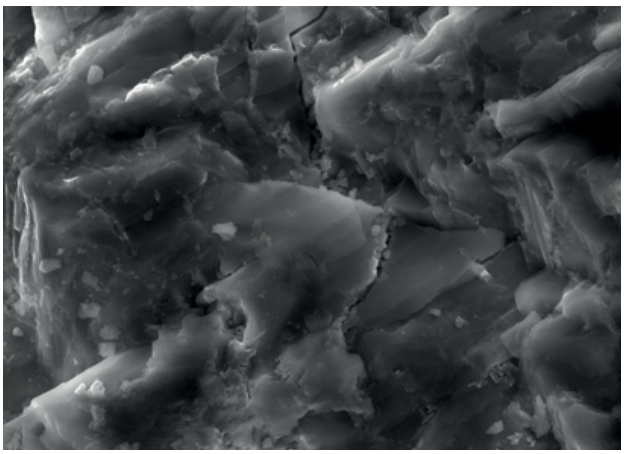
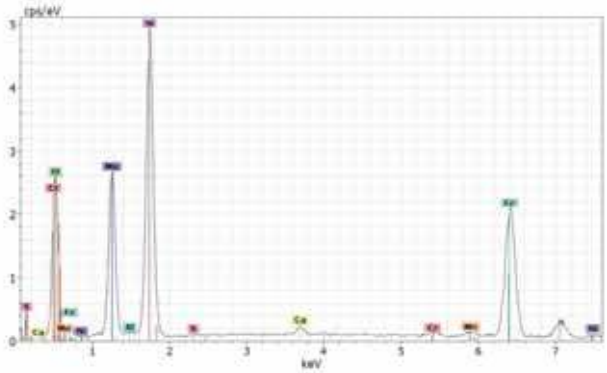


Foto. 6. Widok dla punktu 1 – fotografia wykonana dla poziomego wymiaru obrazu 64.3 µm.



Rys. 3. Widmo składu chemicznego w oparciu o Foto. 6.

Tabela 2. Procentowa zwartość poszczególnych pierwiastków na podstawie Foto. 6 wraz z analizą błędów pomiarowych.

Pierwiastek	Liczba atomowa	Stężenie masowe [%]	Błąd pomiaru [%]
Tlenki	(*)	44.40	19.48
Magnez	12	16,71	3.16
Aluminium	13	0.40	0.19
Krzem	14	22.51	3.24
Siarka	16	0.09	0.01
Wapń	20	0.44	0.14
Chrom	24	0.26	0.12
Mangan	25	0.39	0.14
Żelazo	26	14.36	1.27
Nikiel	28	0.44	0.16

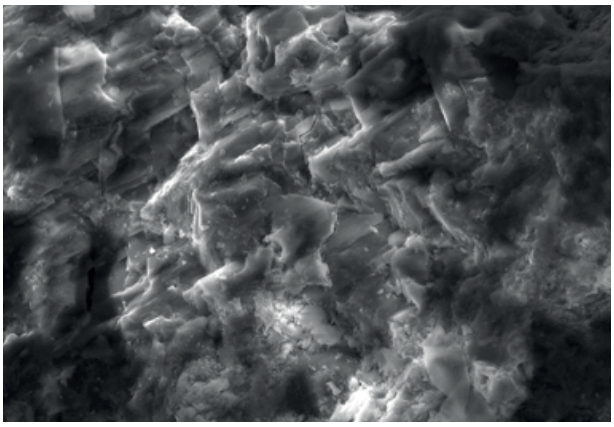
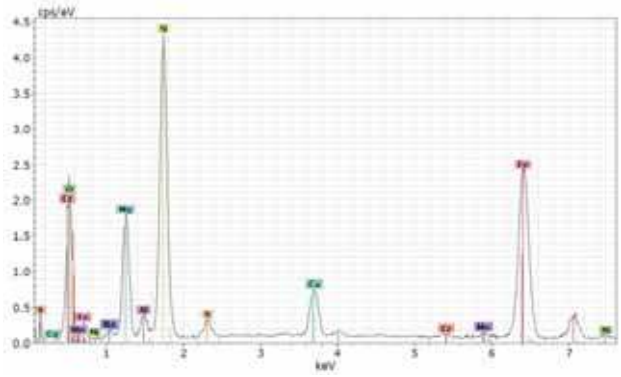


Foto. 7. Widok dla punktu 1 – fotografia wykonana dla poziomego wymiaru obrazu 160 µm.



Rys. 4. Widmo składu chemicznego w oparciu o Foto. 7.

eprasa.pl 6365cfbfa2

Tabela 3. Procentowa zwartość poszczególnych pierwiastków na podstawie Foto. 7 wraz z analizą błędów pomiarowych.

Pierwiastek	Liczba atomowa	Stężenie masowe [%]	Błąd pomiaru [%]
Tlenki	(*)	41.51	18.40
Sód	11	1.66	0.56
Magnez	12	11.90	2.27
Aluminium	13	1.82	0.43
Krzem	14	19.69	2.80
Siarka	16	0.94	0.23
Wapń	20	2.88	0.38
Chrom	24	0.18	0.12
Mangan	25	0.35	0.14
Żelazo	26	18.45	1.56
Nikiel	28	0.60	0.18

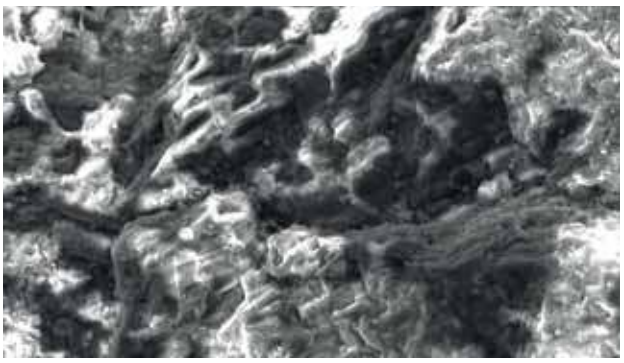
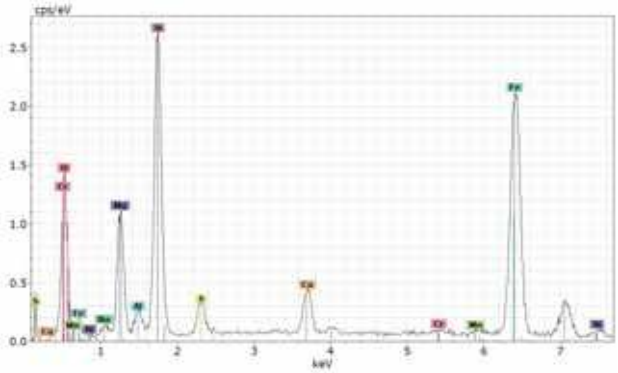


Foto. 8. Widok dla punktu 1 – fotografia wykonana dla poziomego wymiaru obrazu 329 µm.



Rys. 4. Widmo składu chemicznego w oparciu o Foto. 8.

Tabela 4. Procentowa zwartość poszczególnych pierwiastków na podstawie Foto. 8 wraz z analizą błędów pomiarowych.

Pierwiastek	Liczba atomowa	Stężenie masowe [%]	Błąd pomiaru [%]
Tlenki	(*)	38.88	17.18
Sód	11	2.05	0.66
Magnez	12	12.21	2.23
Aluminium	13	2.25	0.51
Krzem	14	20.96	2.81
Siarka	16	2.35	0.41
Wapń	20	2.48	0.35
Chrom	24	0.19	0.12
Mangan	25	0.21	0.12
Żelazo	26	18.11	1.44
Nikiel	28	0.30	0.14

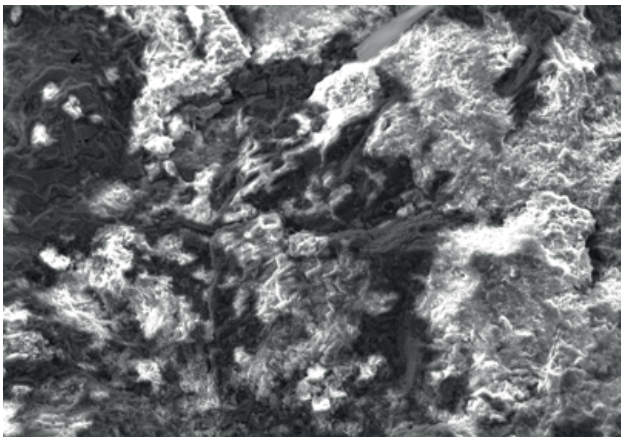
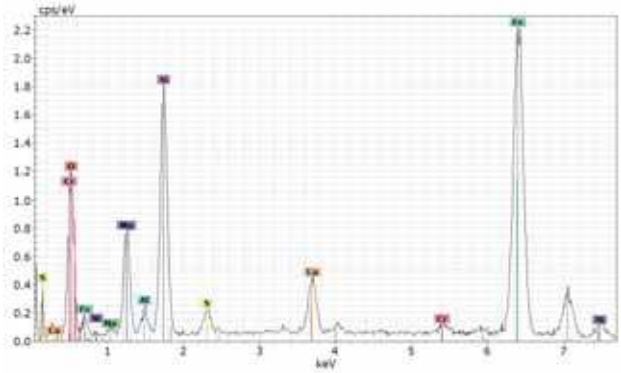


Foto. 9. Widok dla punktu 1 – fotografia wykonana dla poziomego wymiaru obrazu 640 µm.



Rys. 5. Widmo składu chemicznego w oparciu o Foto. 9.

Tabela 5. Procentowa zwartość poszczególnych pierwiastków na podstawie Foto. 9 wraz z analizą błędów pomiarowych.

Pierwiastek	Liczba atomowa	Stężenie masowe [%]	Błąd pomiaru [%]
Tlenki	(*)	36.86	19.11
Sód	11	1.91	0.74
Magnez	12	11.38	2.42
Aluminium	13	2.27	0.59
Krzem	14	16.62	2.59
Siarka	16	1.57	0.36
Wapń	20	2.80	0.42
Chrom	24	0.50	0.17
Żelazo	26	24.93	2.21
Nikiel	28	1.68	0.26

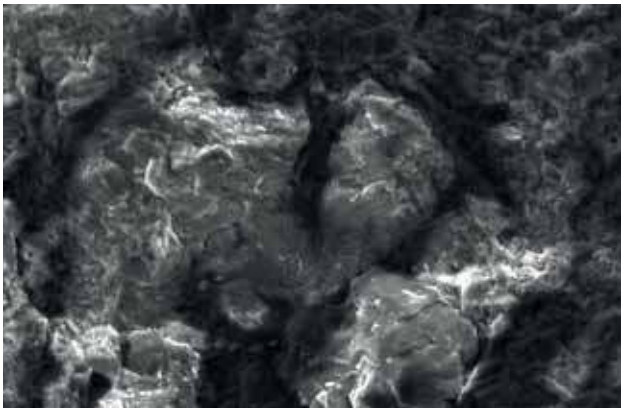
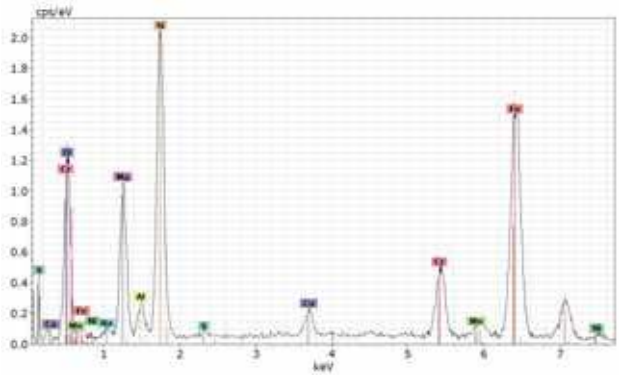


Foto. 10. Widok dla punktu 2 – fotografia wykonana dla poziomego wymiaru obrazu 321 µm.

eprasa.pl 6365cfbfa2



Rys. 6. Widmo składu chemicznego w oparciu o Foto. 10.

Tabela 6. Procentowa zwartość poszczególnych pierwiastków na podstawie Foto. 10 wraz z analizą błędów pomiarowych.

Pierwiastek	Liczba atomowa	Stężenie masowe [%]	Błąd pomiaru [%]
Tlenki	(*)	37.53	20.20
Sód	11	2.16	0.84
Magnez	12	14.47	3.12
Aluminium	13	3.04	0.77
Krzem	14	21.68	3.48
Siarka	16	0.38	0.19
Wapń	20	0.80	0.21
Chrom	24	3.18	0.43
Mangan	25	0.25	0.14
Żelazo	26	16.14	1.55
Nikiel	28	0.36	0.17

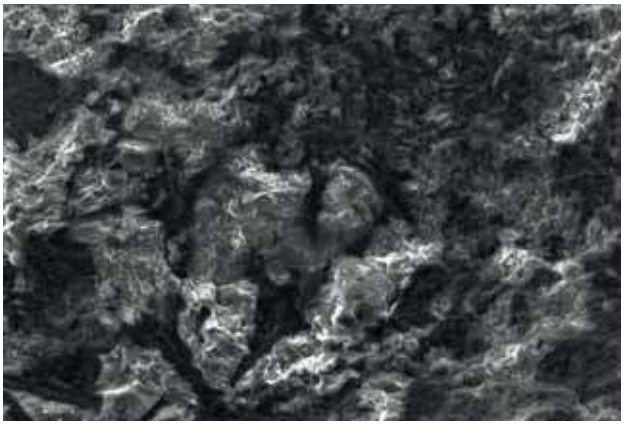
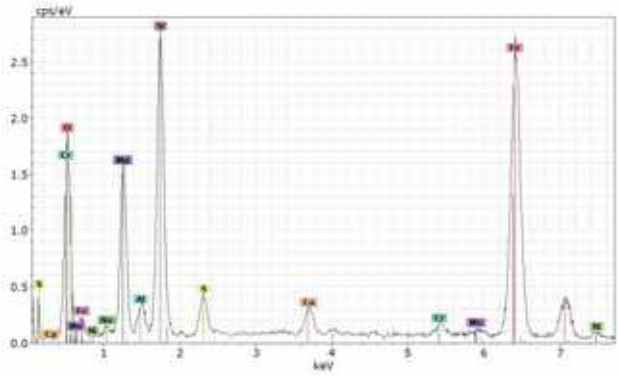


Foto. 11. Widok dla punktu 2 – fotografia wykonana dla poziomego wymiaru obrazu 641 μm.



Rys. 7. Widmo składu chemicznego w oparciu o Foto. 11.

Tabela 7. Procentowa zwartość poszczególnych pierwiastków na podstawie Foto. 11 wraz z analizą błędów pomiarowych.

Pierwiastek	Liczba atomowa	Stężenie masowe [%]	Błąd pomiaru [%]
Tlenki	(*)	39.11	21.69
Sód	11	1.79	0.73
Magnez	12	13.43	3.12
Aluminium	13	2.32	0.63
Krzem	14	16.06	2.83
Siarka	16	1.97	0.43
Wapń	20	0.85	0.22
Chrom	24	0.54	0.18
Mangan	25	0.45	0.17
Żelazo	26	22.36	2.30
Nikiel	28	0.82	0.25

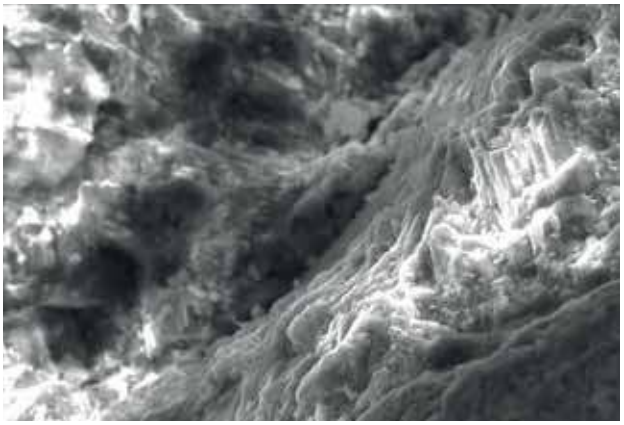
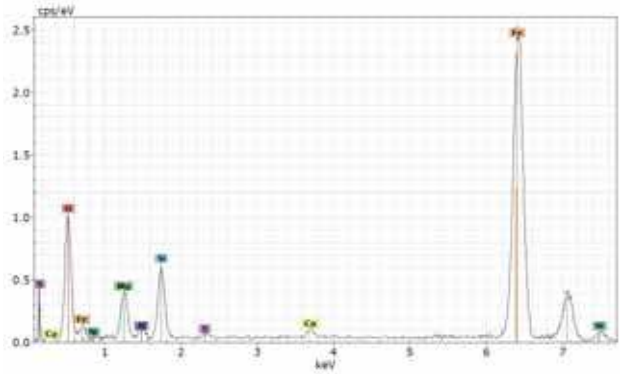


Foto. 12. Widok dla punktu 3 – fotografia wykonana dla poziomego wymiaru obrazu 160 μm.



Rys. 8. Widmo składu chemicznego w oparciu o Foto. 12.

Tabela 8. Procentowa zwartość poszczególnych pierwiastków na podstawie Foto. 12 wraz z analizą błędów pomiarowych.

Pierwiastek	Liczba atomowa	Stężenie masowe [%]	Błąd pomiaru [%]
Tlenki	(*)	36.28	19.30
Magnez	12	11.25	2.61
Aluminium	13	2.08	0.65
Krzem	14	10.22	1.80
Siarka	16	0.40	0.21
Wapń	20	0.80	0.25
Żelazo	26	37.14	3.25
Nikiel	28	1.83	0.41

eprasa.pl 6365cfbfa2

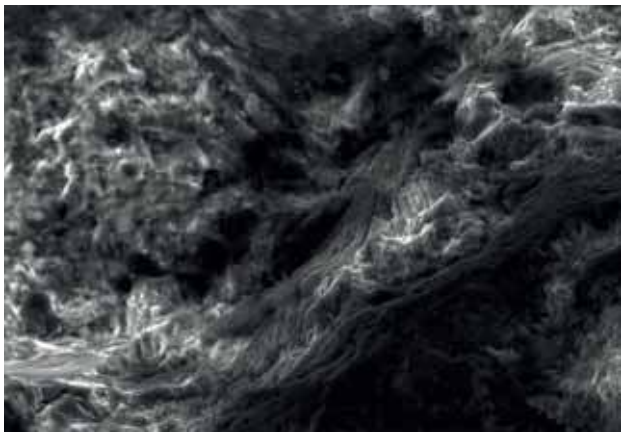
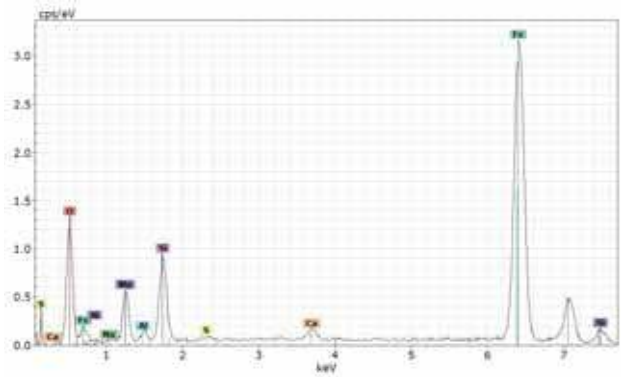


Foto. 13. Widok dla punktu 3 – fotografia wykonana dla poziomego wymiaru obrazu 320 µm.



Rys. 9. Widmo składu chemicznego w oparciu o Foto. 13.

Tabela 9. Procentowa zwartość poszczególnych pierwiastków na podstawie Foto. 13 wraz z analizą błędów pomiarowych.

Pierwiastek	Liczba atomowa	Stężenie masowe [%]	Błąd pomiaru [%]
Tlenki	(*)	34.31	16.86
Sód	11	1.57	0.69
Magnez	12	10.87	2.31
Aluminium	13	1.77	0.51
Krzem	14	10.95	1.75
Siarka	16	1.08	0.25
Wapń	20	2.63	0.42
Żelazo	26	36.49	3.00
Nikiel	28	0,32	0.17

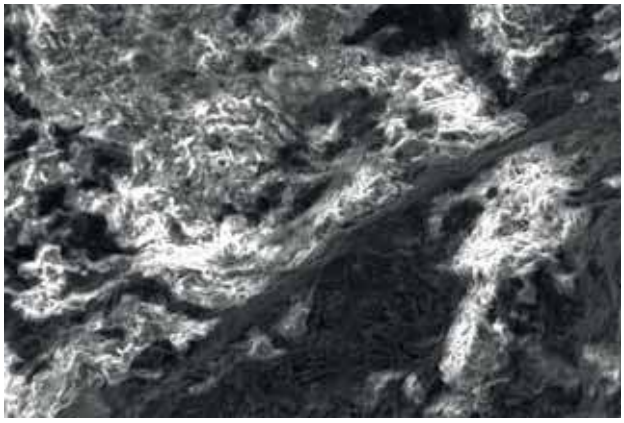
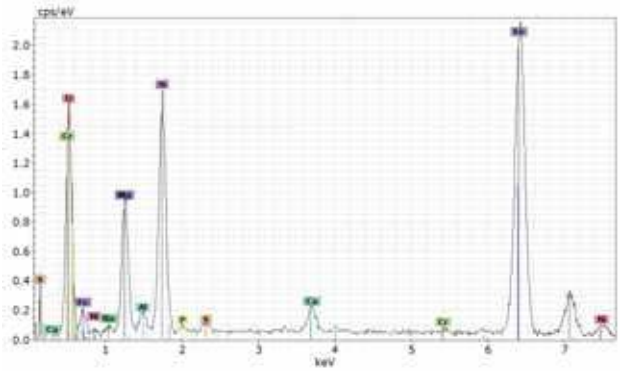


Foto. 14. Widok dla punktu 3 – fotografia wykonana dla poziomego wymiaru obrazu 644 µm.



Rys. 10. Widmo składu chemicznego w oparciu o Foto. 14.

Tabela 10. Procentowa zwartość poszczególnych pierwiastków na podstawie Foto. 14 wraz z analizą błędów pomiarowych.

Pierwiastek	Liczba atomowa	Stężenie masowe [%]	Błąd pomiaru [%]
Tlenki	(*)	41.81	21.74
Sód	11	1.78	0.74
Magnez	12	13.48	2.94
Aluminium	13	2.05	0.58
Krzem	14	15.68	2.59
Fosfor	15	0.50	0.23
Siarka	16	0.53	0.22
Wapń	20	1.17	0.26
Chrom	24	0.14	0.12
Żelazo	26	22.16	2.07
Nikiel	28	0.69	0.21

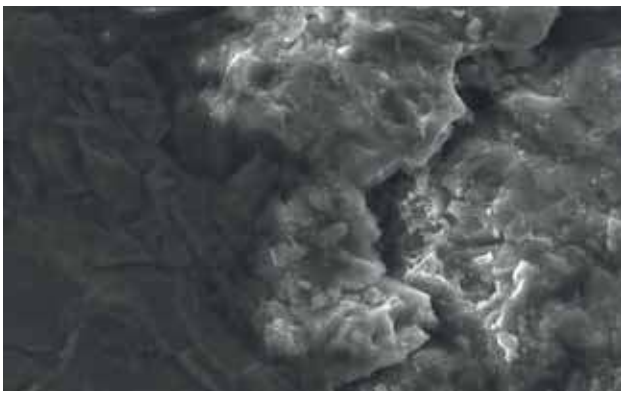
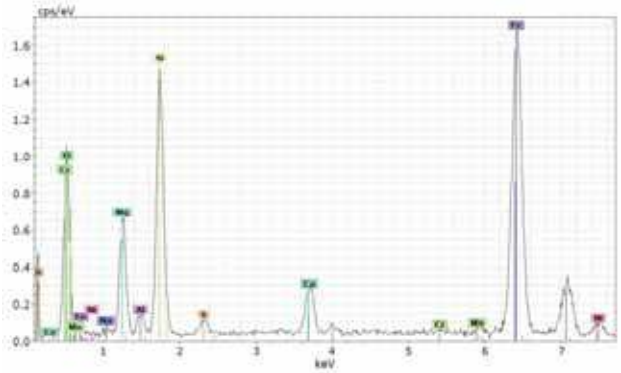


Foto. 15. Widok dla punktu 4 – fotografia wykonana dla poziomego wymiaru obrazu 160 µm.



Rys. 11. Widmo składu chemicznego w oparciu o Foto. 15.

eprasa.pl 6365cfbfa2

Tabela 11. Procentowa zwartość poszczególnych pierwiastków na podstawie Foto. 15 wraz z analizą błędów pomiarowych.

Pierwiastek	Liczba atomowa	Stężenie masowe [%]	Błąd pomiaru [%]
Tlenki	(*)	38.50	20.00
Sód	11	1.99	0.80
Magnez	12	12.63	2.65
Aluminium	13	2.20	0.61
Krzem	14	19.71	3.00
Siarka	16	1.14	0.32
Wapń	20	2.25	0.37
Chrom	24	0.13	0.11
Mangan	25	0.26	0.14
Żelazo	26	19.97	1.76
Nikiel	28	1.21	0.27

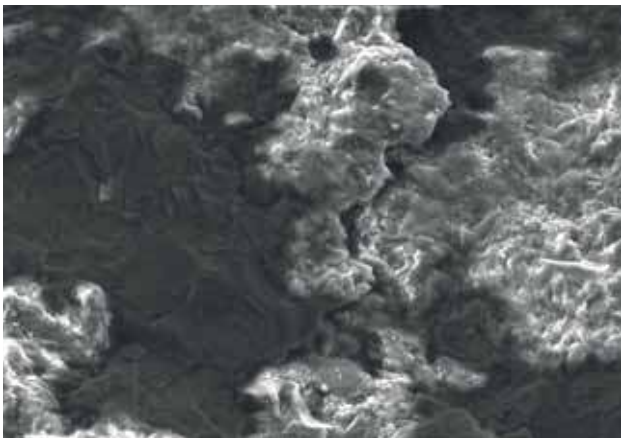
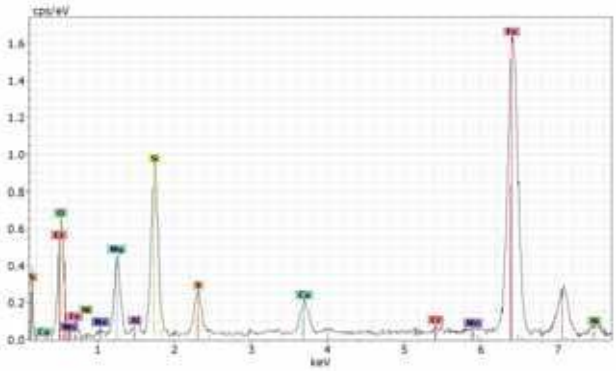


Foto. 16. Widok dla punktu 4 – fotografia wykonana dla poziomego wymiaru obrazu 321 μm.



Rys. 12. Widmo składu chemicznego w oparciu o Foto. 16.

Tabela 12. Procentowa zwartość poszczególnych pierwiastków na podstawie Foto. 16 wraz z analizą błędów pomiarowych.

Pierwiastek	Liczba atomowa	Stężenie masowe [%]	Błąd pomiaru [%]
Tlenki	(*)	33.93	15.56
Sód	11	1.83	0.66
Magnez	12	13.36	2.22
Aluminium	13	1.93	0.49
Krzem	14	20.38	2.43
Siarka	16	5.10	0.70
Wapń	20	2.55	0.36
Chrom	24	0.20	0.13
Mangan	25	0.18	0.12
Żelazo	26	20.36	1.37
Nikiel	28	0.18	0.12

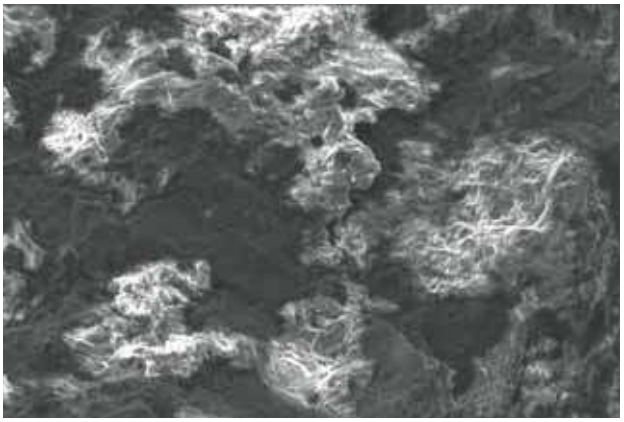
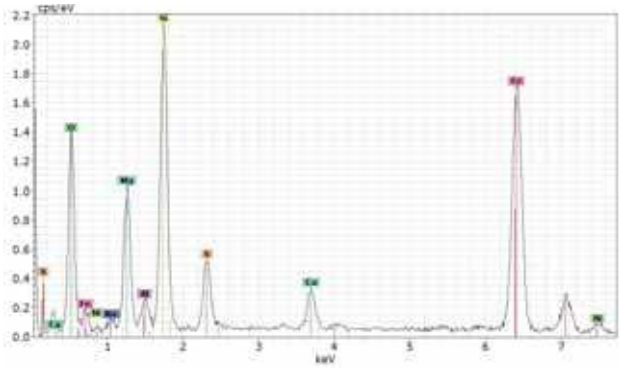


Foto. 17. Widok dla punktu 4 – fotografia wykonana dla poziomego wymiaru obrazu 641 μm.



Rys. 13. Widmo składu chemicznego w oparciu o Foto. 17.

Tabela 13. Procentowa zwartość poszczególnych pierwiastków na podstawie Foto. 17 wraz z analizą błędów pomiarowych.

Pierwiastek	Liczba atomowa	Stężenie masowe [%]	Błąd pomiaru [%]
Tlenki	(*)	42.41	20.48
Sód	11	2.04	0.72
Magnez	12	12.31	2.47
Aluminium	13	2.40	0.58
Krzem	14	17.82	2.65
Siarka	16	4.06	0.64
Wapń	20	2.14	0.35
Żelazo	26	16.47	1.45
Nikiel	28	0.35	0.15

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki analizy struktury meteorytu oraz jego składu chemicznego z wykorzystaniem współczesnego skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Podczas realizacji badań wykonano szereg zdjęć w różnych częściach badanej próbki. W pracy zostały przedstawione najciekawsze wyniki analizy SEM pod względem budowy i struktury poszczególnych fragmentów powierzchni meteorytu (widok z góry). Dla tych powierzchni w oparciu o analizator EDS wykonano charakterystykę składu chemicznego najciekawszych struktur, które zostały przedstawione na widmach.

dokończenie na str. 43

eprasa.pl 6365cfbfa2

Wojewódzki Konkurs Fizyczny (wkf) w szkole podstawowej

Alicja **Szymańska**

Przekornie rozpocznę ten artykuł od stwierdzenia, że w opinii uczniów szkół podstawowych fizyka nie należy do najłatwiejszych, a co za tym idzie, najbardziej ulubionych przedmiotów. Dlatego nauczycieli tak cieszy fakt, iż jest grono wychowanków, którzy chcą pogłębiać swoją wiedzę i umiejętności w tym zakresie.

Dobrym momentem do tego typu działań są konkursy. Zachęcają one i skutecznie mobilizują uczniów do rozwijania zdobytych w czasie lekcji wiadomości. Dodatkowo istotną zachętą jest nagroda, jaka czeka na koniec zmagań. Najwybitniejsi, najbardziej pracowici uczniowie, często zdopingowani przez nauczycieli i dodatkowo przez rodziców, mają wtedy możliwość poszerzenia swojej wiedzy. Nie można tutaj pominąć samej motywacji ucznia. Jest ona niezbędna do tego, żeby rozpocząć, a później sukcesywnie utrwalać zdobywane informacje.

Udział w konkursach oprócz tego, że daje wymierne korzyści związane z uzyskaniem jakiejś lokaty lub nagrody, to również kształtuje szereg postaw połączonych ze współzawodnictwem i odpowiedzialnością za własny rozwój. Uczniowie stają się bardziej samodzielni w poszukiwaniu potrzebnych informacji, chętnie pracują w grupie i wzajemnie się uczą, świadomie planują proces systematycznej nauki.

W szkołach podstawowych odbywają się różne konkursy: interdyscyplinarne, kreatywnego myślenia, plastyczne, muzyczne. Mogą być one jednoetapowe lub wielopoziomowe: szkolne, międzyszkolne, wojewódzkie, krajowe oraz międzynarodowe. Najmłodsi najchętniej uczestniczą w zawodach jednoetapowych o charakterze sportowym lub artystycznym. Starsi uczniowie próbują swoich sił w konkursach przedmiotowych, szczególnie tych organizowanych przez kuratoria oświaty. Robią to chętnie, ponieważ laureat lub finalista takiego konkursu zdobywa szereg uprawnień. Najważniejszym jest to, że uczeń będzie przyjęty do wybranej szkoły, niezależnie od kryteriów naboru, w pierwszej kolejności. Dodatkowo jest zwolniony z udziału w odpowiedniej części egzaminu ósmoklasisty (w roku szkolnym 2018/19 z języka polskiego, matematyki lub języka obcego). Ponadto otrzymuje roczną ocenę celującą z przedmiotu, którego dotyczył konkurs. Jak widać jest o co walczyć. Dlatego nie powinien nas dziwić fakt, że są uczniowie, którzy chętnie podejmują trud przygotowania się do takiego sprawdzenia wiedzy i umiejętności.

Wojewódzki Konkurs Fizyczny (WKF) w liczbach.

Organizatorem tego typu konkursów są kuratoria oświaty. To one w regulaminach opisują zasady przebiegu rywalizacji. Określają liczbę poziomów (stopni), terminy, zasady kwalifikacji uczniów do kolejnego etapu, procedury odwoławcze itp. To również te instytucje bardzo często podają wyniki. Czasami pojawiają się one na stronach internetowych szkół, w których odbywał się konkurs lub na stronach ośrodków metodycznych. Nie została ustalona jednolita forma prezentowania danych. W związku z tym nie wszystkie informacje są publikowane w jednakowym zakresie. Dlatego nie zawsze można dokonać porównania.

Prawie wszystkie kuratoria w Polsce w roku szkolnym 2018/19 postanowiły przeprowadzić Wojewódzki Konkurs Fizyczny dla szkół podstawowych. Nie odbywał się on tylko w czterech regionach: dolnośląskim, łódzkim, opolskim i świętokrzyskim. Mogło to być spowodowane tym, że na egzaminie po klasie ósmej nie sprawdzano wiedzy przyrodniczej (tak jak to miało miejsce na egzaminie gimnazjalnym), a w związku z tym uzyskanie tytułu laureata np. z fizyki, chemii, biologii czy geografii, nie zwalniało ucznia ostatniej klasy szkoły podstawowej z pisania któregoś z testów egzaminacyjnych.

Konkurs w większości przypadków podzielony był na trzy etapy: szkolny, rejonowy (okręgowy) i wojewódzki. Jedynie w województwie warmińsko-mazurskim miał on dwie części: szkolną i wojewódzką. Po przeprowadzonym etapie publikowane były wyniki i podawana była informacja o kwalifikacji do dalszej części rywalizacji. Po finale publikowana była lista laureatów i finalistów.

Niestety bardzo rzadko zamieszczane są informacje dotyczące ilości uczniów biorących udział w etapie szkolnym. Szkoda, ponieważ mogłoby to pośrednio świadczyć o zainteresowaniu konkursem i jego popularnością. Ponadto w niektórych regulaminach pojawia się zapis mówiący, iż liczba uczniów przechodzących do kolejnego etapu, uzależniona jest od liczby uczestników.

Brak danych może być również spowodowany tym, że informacje zamieszczane są w zamkniętym systemie i udostępniane jedynie po zalogowaniu. Tak jest w województwie śląskim. Informacje dotyczące liczby osób zakwalifikowanych do kolejnego etapu, liczby finalistów i laureatów w poszczególnych województwach zamieszczone zostały w tabeli 1.

Regulaminy

Organizatorami Wojewódzkich Konkursów Fizycznych są kuratoria oświaty. To one, samodzielnie ustalają zasady ich przeprowadzania. Dlatego w każdym województwie mogą się one od siebie różnić. Odmiennie mogą być ustalane progi procentowe kwalifikacji uczniów do kolejnych etapów. Są one inne przy przejściu z etapu szkolnego do rejonowego oraz z rejonowego do wojewódzkiego. I tak w dwóch województwach, aby zakwalifikować się do drugiej części konkursu należało zdobyć 90% punktów możliwych do uzyskania (woj. lubelskie i podlaskie). 85% trzeba było uzyskać w woj. lubuskim i śląskim.

eprasa.pl 6365cfbfa2

Tabela 1.

Organizator/kuratorium oświaty	Liczba uczniów biorących udział w etapie szkolnym	Liczba uczniów zakwalifikowanych do etapu rejonowego	Liczba uczniów zakwalifikowanych do etapu wojewódzkiego	Liczba finalistów	Liczba laureatów
Kujawsko-Pomorskie Kuratorium Oświaty	b. d.	73	35	0	35
Lubelskie Kuratorium Oświaty	b. d.	95	19	8	11
Lubuskie Kuratorium Oświaty	b. d.	118	25	9	16
Małopolskie Kuratorium Oświaty	b. d.	301	55	35	11
Mazowieckie Kuratorium Oświaty	b. d.	102	33	17	16
Podkarpackie Kuratorium Oświaty	b. d.	98	50	26	24
Podlaskie Kuratorium Oświaty	487	38	21	5	16
Pomorskie Kuratorium Oświaty	b. d.	50	24	9	5
Śląskie Kuratorium Oświaty	b. d.	b. d.	b. d.	b. d.	b. d.
Warmińsko-Mazurskie Kuratorium Oświaty	b. d.	Konkurs odbywał się w dwóch etapach: szkolnym i wojewódzkim	87	42	31
Wielkopolskie Kuratorium Oświaty	b. d.	114	b. d.	35	14
Zachodniopomorskie Kuratorium Oświaty	b. d.	191	56	32	23

b. d. – brak danych

W innych próg był nieco niższy. 80% punktów możliwych do zdobycia wystarczyło do kwalifikacji do etapu rejonowego np. w woj. zachodniopomorskim i kujawsko-pomorskim. W regulaminie konkursu organizowanego przez Pomorskie KO znajdziemy informację, że aby przejść do etapu rejonowego potrzeba zdobyć 70% punktów możliwych do uzyskania, a w regulaminie Małopolskiego KO tylko 60%. Są to spore różnice.

Nieco bardziej jednolite były kryteria w kolejnym etapie. Kwalifikacja z poziomu rejonowego (okręgowego) do wojewódzkiego wymagała najczęściej 90% (3 województwa) lub 85% punktów (4 województwa). Były też województwa, w których wystarczyło 70% punktów (woj. małopolskie, pomorskie).

Zakwalifikowanie się do finałowej rundy wcale nie gwarantowało uzyskania tytułu. Uczniowie, którzy przeszli do ostatniej części konkursu uzyskiwali tytuł finalisty po zdobyciu najczęściej 30% punktów z ostatniego testu (8 województw). Zaś tytuł laureata otrzymywało się po zdobyciu 90% punktów. Tak określiło to w regulaminie ośmiu organizatorów. Bywały też progi 85% lub 80%.

Podkarpackie KO uzależniło ilość zakwalifikowanych do kolejnego etapu osób i liczbę tytułów laureata oraz finalisty od liczby uczestników konkursu. W innych województwach stosowano tę zasadę w momencie, gdy test rozwiązywany przez uczniów okazał się zbyt trudny i do kolejnego etapu przechodziła bardzo mała liczna uczestników. Odmiennie kształtowały się progi kwalifikacyjne w województwie warmińsko-mazurskim, gdyż były tam przeprowadzane tylko dwa etapy WKF. Dokładne dane prezentuje tabela 2.

Czego i z czego uczeń miał się nauczyć

Organizatorzy konkursów wiedzy zawsze podają zagadnienia, które będą na nich obowiązywały. Nie inaczej jest i na WKF. Zakres materiału szczegółowo określa treści jakie pojawią się później w zadaniach na poszczególnych etapach konkursu. Po jego analizie można dokładnie rozplanować tempo powtarzania lub uzupełniania informacji oraz przećwiczyć rozwiązywanie odpowiednich zadań jakościowych i ilościowych.

We wszystkich województwach na konkursie obowiązywały zagadnienia z podstawy programowej. Najczęściej były one podzielone równomiernie na każdy etap. Dodatkowo zostało to tak rozplanowane, że na ogół na etap szkolny obowiązywały zagadnienia omawiana na początku klasy siódmej (np. ruch i siły, praca, moc, energia, właściwości materii), które zostały już opracowane, a kolejne pojawiały się sukcesywnie na następnych etapach.

W niektórych województwach zakres materiału dotyczący własności materii zawierał również treści dotyczące procesów cieplnych. W innych były one wydzielone. Wszyscy organizatorzy WKF, zastrzegli sobie możliwość wprowadzenie materiału wykraczającego poza podstawę programową. Ogólne dane dotyczące zakresu materiału w poszczególnych województwach przedstawia tabela 3.

Często, ze względu na czytelność porównywania, zostały one opisane hasłami treści nauczania podstawy programowej z fizyki dla II etapu edukacyjnego. Niektóre zagadnienia były rozdzielane na dwa etapy. Zestawienie nie zawiera dodatkowych, wykraczających wiadomości lub znacznego rozszerzenia treści omawianych w szkole podstawowej. Kolejne etapy konkursu uwzględniały materiał z wcześniejszej części.

Po tym jak uczeń dowiedział się co będzie obowiązywało na konkursie, to jeszcze została mu zaproponowana odpowiednia literatura. Pozycją obowiązkową były podręczniki szkolne i zeszyty ćwiczeń dla II etapu edukacyjnego dopuszczone do użytku przez Ministra Edukacji

eprasa.pl 6365cfbfa2

Tabela 2.

Organizator	Procent punktów potrzebny do przejścia z etapu szkolnego do rejonowego	Procent punktów potrzebny do przejścia z etapu rejonowego do wojewódzkiego	Procent punktów potrzebny do uzyskania tytułu finalisty	Procent punktów potrzebny do uzyskania tytułu laureata
Kujawsko-Pomorskie Kuratorium Oświaty	80%	85%	30%	90%
Lubelskie Kuratorium Oświaty	90%	90%	30%	90%
Lubuskie Kuratorium Oświaty	85%	85%	30%	90%
Małopolskie Kuratorium Oświaty	60%	70%	50%	85%
Mazowieckie Kuratorium Oświaty	80%	90%	30%	90%
Podkarpackie Kuratorium Oświaty	Progi kwalifikacyjne zależą od ilości uczestników konkursu.			
Podlaskie Kuratorium Oświaty	90%	90%	30%	90%
Pomorskie Kuratorium Oświaty	70%	70%	30%	80%
Śląskie Kuratorium Oświaty	85%	85%	30%	90%
Warmińsko-Mazurskie Kuratorium Oświaty	Konkurs odbywał się w dwóch etapach. Należało uzyskać 80% punktów, żeby przejść z poziomu szkolnego do wojewódzkiego.		60%	85%
Wielkopolskie Kuratorium Oświaty	80%	84%	52%	90%
Zachodniopomorskie Kuratorium Oświaty	80%	85%	30%	90%

Tabela 3.

Organizator	Zakres materiału do etapu szkolnego	Zakres materiału do etapu rejonowego	Zakres materiału do etapu wojewódzkiego
Kujawsko-Pomorskie Kuratorium Oświaty	Ruch prostoliniowy i siły, energia, właściwości materii, elektryczność, magnetyzm.	Ruch drgający i fale.	Fale elektromagnetyczne i optyka.
Lubelskie Kuratorium Oświaty	Szkolne komisje same określały zakres materiału i układały test.	Cała podstawa programowa II etapu edukacyjnego z fizyki.	Cała podstawa programowa II etapu edukacyjnego z fizyki.
Lubuskie Kuratorium Oświaty	Ruch, siły, zasady dynamiki, pęd, energia mechaniczna, energia wewnętrzna, właściwości materii, hydrostatyka, elektryczność, magnetyzm.	Ruch, siły, zasady dynamiki, pęd, energia mechaniczna, energia wewnętrzna, właściwości materii, hydrostatyka, elektryczność, magnetyzm.	Ruch drgający, fale mechaniczne, optyka.
Małopolskie Kuratorium Oświaty	Ruch i siły, energia, właściwości materii.	Zjawiska cieplne, elektryczność, magnetyzm, ruch drgający, fale.	Optyka, fale elektromagnetyczne.
Mazowieckie Kuratorium Oświaty	Ruch i siły, energia, właściwości materii.	Elektryczność, ruch drgający i fale.	Magnetyzm, optyka.
Podkarpackie Kuratorium Oświaty	Ruch i siły, energia, zjawiska cieplne, własności materii.	Elektryczność, magnetyzm.	Ruch drgający i fale mechaniczne, optyka.
Podlaskie Kuratorium Oświaty	Ruch i siły, energia i zjawiska cieplne, właściwości materii.	Elektryczność, magnetyzm, ruch drgający i fale.	Optyka.
Pomorskie Kuratorium Oświaty	Ruch i siły, praca, moc, energia mechaniczna, zjawiska termiczne, właściwości materii.	. Elektryczność.	Magnetyzm, optyka, drgania i fale.
Śląskie Kuratorium Oświaty	Ruch i siły, energia, zjawiska cieplne, właściwości materii.	Elektryczność, ruch drgający i fale.	Magnetyzm, optyka.
Warmińsko-Mazurskie Kuratorium Oświaty	Ruch i siły, energia, zjawiska cieplne, właściwości materii, elektrostatyka.		Cała podstawa programowa II etapu edukacyjnego z fizyki.
Wielkopolskie Kuratorium Oświaty	Ruch i siły, energia, zjawiska cieplne, właściwości materii.	Ruch drgający, fale mechaniczne, elektryczność.	Magnetyzm i optyka.
Zachodniopomorskie Kuratorium Oświaty	Cała podstawa programowa II etapu edukacyjnego z fizyki.	Rozszerzenie: ruch i siły, energia, ruch drgający, budowa ciał, elektrostatyka, pęd.	Rozszerzenie: termodynamika, magnetyzm, optyka, astronomia i budowa Układu Słonecznego.

eprasa.pl 6365cfbfa2

Narodowej. Często zalecane były również podręczniki i zbiory zadań do gimnazjum. W zależności od poszerzenia zakresu materiału o dodatkowe zagadnienia, do etapu rejonowego lub wojewódzkiego ponadto podawano uzupełniającą literaturę tematyczną.

Na zakończenie

Reforma szkolnictwa spowodowała powrót fizyki do szkół podstawowych. Materiał z tego przedmiotu jest realizowany w klasach VII i VIII. Rok szkolny 2018/19 to rok, w którym po raz pierwszy została zrealizowana cała podstawa programowa. Dlatego też w wielu województwach zainicjowano organizację Wojewódzkiego Konkursu Fizycznego.

Bardzo trudno jest porównywać i statystycznie opracowywać uzyskane dane. Jednak powyższa analiza pokazuje, że są województwa, w których zarówno zakres materiału, jak i kryteria kwalifikacji są do siebie bardzo podobne. Dzięki temu jest duża jednolitość w procesie wyłaniania laureatów i finalistów. Pozwala to również intuicyjnie porównywać wyniki, a dla uczniów i ich rodziców daje poczucie, że laureat z województwa X jest „równy" laureatowi z województwa Y.

Inni organizatorzy odmiennie ustalają kryteria kwalifikacji, jednak nie odróżniają się od innych w kwestii doboru treści materiału. Określenie stopnia trudności poszczególnych zadań, ich wykonalności nie jest możliwe bez wglądu do prac. Takie porównanie pozwoliłoby (podobnie jak to ma miejsce przy zewnętrznych egzaminach) przeanalizować skuteczność opanowania wiadomości i umiejętności poszczególnych treści programowych wśród uczniów, którzy są szczególnie zainteresowani fizyką.

Udział w konkursach to bardzo dobra okazja do pogłębiania zdobytej wiedzy. To również moment, w którym uczniowie opanowują wiele kluczowych kompetencji, a w szczególności tych naukowo-technicznych. Jednocześnie nasi wychowankowie uczą się wtedy pracy w grupie, planowania, współzawodnictwa, cieszenia się z osiąganych sukcesów i przyjmowania ewentualnych porażek. Dlatego zachęcajmy ich do uczestnictwa w takiej rywalizacji.

Alicja Szymańska
nauczyciel fizyki i biologii w Szkole Podstawowej nr 4
im. Sybiraków w Białymstoku.

Badanie właściwości fizyko-chemicznych meteorytu za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego

dokończenie ze str. 39

Zawartość poszczególnych pierwiastków w danym widmie reprezentuje średni skład chemiczny meteorytu w danym miejscu jego badania. Wykonana analiza średniego składu chemicznego meteorytu pokazuje, że głównymi pierwiastkami, które tworzą jego materię są: O, Fe, Si, Ni, Mg.

W tym miejscu należy zauważyć, że w każdym widmie mamy stosunkowo dużą ilość tlenu. Jednak nie jest to czysty tlen, ale różne tlenki związane z poszczególnymi pierwiastkami (np. tlenek krzemu (SiO, SiO_2), tlenek żelaza (FeO, FeO_2). Warto ponadto zauważyć, że koncentracja w procencie masowym jest inna dla każdego widma. Jednakże dla większości otrzymanych wyników pierwiastki te są dominujące. Ponadto w badanej strukturze meteorytu identyfikowano inne jego składniki: Ca, S, Cr, Al., C, o łącznym wkładzie mniejszym niż 10%.

Szczegółowa analiza procentowej zawartości pierwiastków chemicznych na podstawie widma została przedstawiona w tabelach. Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analiz możemy wnioskować, że badany meteoryt należy do grupy ~~do~~ chondrytów zwyczajnych typu H. Stwierdzenie to wynika z analizy zawartości żelaza w badanej próbce meteorytu.

dr Marcin Wesołowski[1,2], mgr inż. Wioletta Kondziołka[1,2]

1. Kolegium Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk Fizycznych, Uniwersytet Rzeszowski,
2. Centrum Innowacji i Transferu Wiedzy Techniczno – Przyrodniczej Uniwersytetu Rzeszowskiego,

LITERATURA

1. A'Hearn, M. F., Belton M. J. S., Delamere, W. A., Feaga, L. M., Hampton D., et al., 2011. EPOXI at Comet Hartley 2, Science 332, 1396.
2. Belton M. J. S., 2010. Cometary activity, active areas, and a mechanism for collimated outflows on 1P, 9P, 19P, and 81P, Icarus 210, 881.
3. Fougere N. et al., 2012. Understanding measured water rotational temperatures and column densities in the very innermost coma of Comet 73P/Schwassmann-Wachmann 3 B, Icarus 221, 174.
4. Gronkowski P. and Wesołowski M., 2012. Collisions of comets and meteoroids: The post Stardust-NExT discussion. Astronomische Nachrichten 333, 721.
5. Gronkowski P., Wesołowski M., 2015. The influence of the nucleus shape on the maximum size of grains ejected from a comet by gentle sublimation and jet-like features. Astronomische Nachrichten 336, 362.
6. Gronkowski P., Wesołowski M., 2017. Ejection of large particles from cometary nuclei in the shape of prolate ellipsoids. Astronomische Nachrichten 38, 385.
7. Hutchison R., 2004. Meteorites-A petrologic, chemical and isotopic synthesis. Cambridge.
8. Jones J., 1995. The ejection of meteoroids from comets, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 275, 773.
9. Wesołowski M., Gronkowski P., Tralle I., 2019. On migration of dust and ice grains on the surface of the rotating comet nucleus, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 484, 2309.
10. Yelle R. V., Soderblom L. A., Jokipii J. R., 2004. Formation of jets in Comet 19P/Borrelly by subsurface geysers, Icarus 167, 30.
11. https://pl.wikipedia.org/wiki/Meteoryt
12. https://en.wikipedia.org/wiki/Meteorite

eprasa.pl 6365cfbfa2

Ziemia planeta wyjątkowa – cz. 10

Oceany

Rys 1. Ziemia oglądana z kosmosu. Jak widać ma ona przeważająco niebieski kolor spowodowany obecnością oceanów. Foto – Dreamstime

Aby mogła powstać rozwinięta cywilizacja techniczna konieczne było istnienie na powierzchni Ziemi dwóch zasadniczo różnych typów struktur: oceanów i lądów. Oceanów jest więcej, więc zacznijmy omawianie powierzchni Ziemi od nich właśnie.

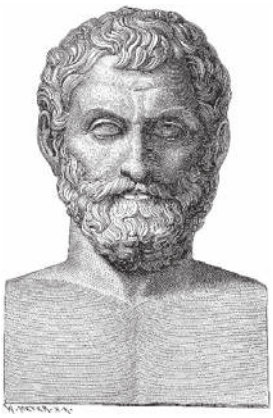
Zbigniew **Wiśniewski**

Wielki zbiornik na wodę

Ziemia oglądana z Kosmosu, a ściśle z perspektywy satelitów ją otaczających, jest kolorowa z przewagą niebieskiego. Ten kolor wynika z obecności oceanów. Czym są oceany? Możemy uważać je za gigantyczny zbiornik na wodę. To co czyni Ziemię wyjątkową, to fakt występowania takich zbiorników wypełnionych ciekłą wodą. Oceany zawierają 1370 milionów kilometrów sześciennych wody (Stenz,1956).

Mimo rozlicznych poszukiwań, jak do tej pory nie udało się znaleźć innego obiektu w naszym Układzie Słonecznym, gdzie występowałyby na powierzchni zbiorniki z płynną wodą. Ostatnio mówi się, że poza Układem Słonecznym mogą występować planety, na powierzchni których może istnieć ciekła woda, ale dowody na ich faktyczne istnienie są natury raczej spekulatywnej.

Oczywiście, należy zaznaczyć, że pod pojęciem oceany rozumiemy tu nie tylko trzy wielkie akweny, ale też morza. Ciekła woda jest podstawowym środowiskiem, w którym zachodzą reakcje chemiczne warunkujące życie. Nic więc dziwnego, że organizmy żywe są zbudowane w przeważającej części z wody. Najlepiej widać to na przykładzie stułbi, która w ponad 90% składa się z wody. Człowiek zbudowany jest w 60-70% z wody. Mózg, którego działanie opiera się na przewodzeniu elektrolitycznym ma jej 80%. Nawet kości składają się w 22% z wody.



Rys. 2. Tales z Miletu. Jeden z pierwszych filozofów przyrody. Żył między 624-546 p.n.e. Zwolennik teorii o wodzie jako pierwotnej cząstce materii.

O niezwykłości wody były przekonane wszystkie antyczne cywilizacje, również te śródlądowe. Tales z Miletu, znany nam ze słynnego twierdzenia, uważał wodę za pierwotną zasadę, czyli substancje, która dała początek innym substancjom.

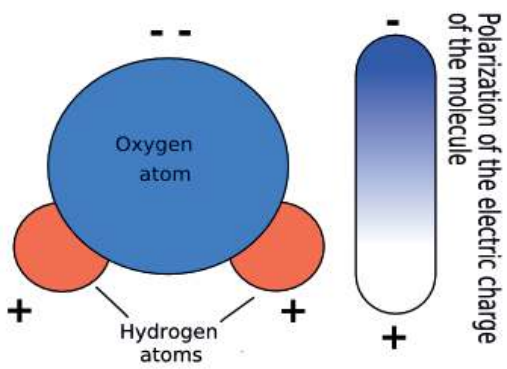
W późniejszych czasach za sprawą Empedoklesa i Arystotelesa upowszechnił się pogląd, że woda jest jednym z czterech pierwiastków, czyli substancji tworzących Ziemię.

To, że woda nie jest pierwiastkiem a związkiem chemicznym wykazał w 1783 roku uczony brytyjski Humphrey Davy.

Słona woda

Cząsteczki formujące wodę składają się z dwóch atomów wodoru i jednego atomu tlenu. Aby cząstka mogła powstać wodory muszą przekazać swoje elektrony w pobliże tlenu. Tlen zyskuje w wyniku tego ładunek ujemny a pozbawione elektronu wodory ładunek dodatni. Cząstka wody ma nietrywialny kształt. Atomy wodoru nie są bowiem ustawione naprzeciwko siebie z atomem tlenu pośrodku. Atom tlenu jest odrobinę wypchnięty na bok przez co cząsteczka wody uzyskuje kształt trójkątny.

W wyniku takiego ukształtowania cząsteczka wody nabiera ciekawych właściwości elektrycznych. Staje się bowiem dipolem o momencie dipolowym równym $6{,}15*10^{-30}$ C*m. Dzięki tej właściwości jest w stanie rozrywać wiązania substancji jonowych, czyli mówiąc bardziej normalnie – rozpuszczać sól. Każdy kto był kiedykolwiek nad jakimkolwiek morzem mógł się przekonać,



Rys. 3. Cząsteczka wody (źródło: wikipedia).

eprasa.pl 6365cfbfa2

że woda morska ma słono-gorzki smak. Spowodowane jest to zawartością w wodzie morskiej różnych związków chemicznych, głównie chlorku sodu, określanego jako sól kuchenna, która stanowi 75% masy soli morskiej. Poza tym znajdziemy tam 10% chlorku magnezowego, 5% węglanu wapniowego.

Wymienione substancje chemicy nazywają solami. Pod tym pojęciem chemicy rozumieją związki metali z anionami, którymi mogą być niemetale. Należy jednak podkreślić, że przedstawiony tu opis nie jest zbyt precyzyjny. Sole w wodzie morskiej ulegają bowiem dysocjacji na aniony i kationy. Tak więc w wodzie morskiej nie znajdziemy cząsteczki soli NaCl tylko jon Na+ i jon Cl-, które w procesie odparowywania uformują cząsteczką NaCl. Najczęściej występujące jony noszą nazwę jonów głównych, reszta to substancje śladowe.

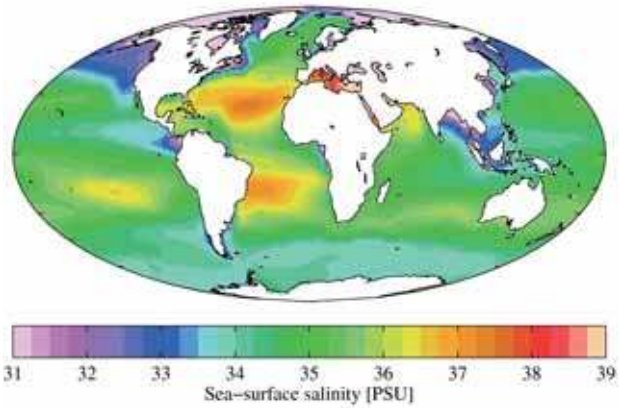
W wodzie morskiej jest praktycznie cała tablica Mendelejewa nie wyłączając uranu i złota. Tego ostatniego jest w wodzie 8 mln ton. Całkowita zawartość soli w wodzie morskiej wynosi 50 000 bilionów ton.

Innym ważnym składnikiem „morskiej soli" jest żelazo i fosfor. Przeciętna zawartość soli w wodach oceanów to 3,5%. Jest w niej też rozpuszczony uran i niektórzy naukowcy, głównie Japończycy twierdzą, że istnieje możliwość pozyskiwania go z tego źródła i wykorzystywania jako paliwa jądrowego.

W tym momencie pozwolę sobie zrobić małą dygresję. Starsi czytelnicy z pewnością pamiętają film Barei „Poszukiwany, poszukiwana". Jeden z bohaterów prowadził rozważania dotyczące ilości cukru w cukrze. Można postawić identyczne pytanie dotyczące wody morskiej. Jeśli spytamy – ile jest wody w 1 kg wody morskiej, to odpowiedź jest 965 g, reszta to sól.

Należy pamiętać, że zawartość soli w wodzie morskiej nie wszędzie jest jednakowa. Najwięcej soli zawiera Morze Śródziemne, najmniej soli z kolei znajdziemy w wodzie północnych rejonach Oceanu Spokojnego.

Na zawartość soli w wodzie morskiej ma wpływ wiele czynników. Najważniejsze z nich to szybkość parowania i sąsiedztwo zbiorników wody słodkiej. Tą właśnie obecnością arktycznych lodowców i zmniejszonym parowaniem można wytłumaczyć obniżoną zawartość soli w północnych rejonach Oceanu Spokojnego.



Rys. 4. Różnice w zawartości soli morskiej w oceanach. Źródło: https://en.wikipedia.org/wiki/Seawater

Właściwości wody morskiej

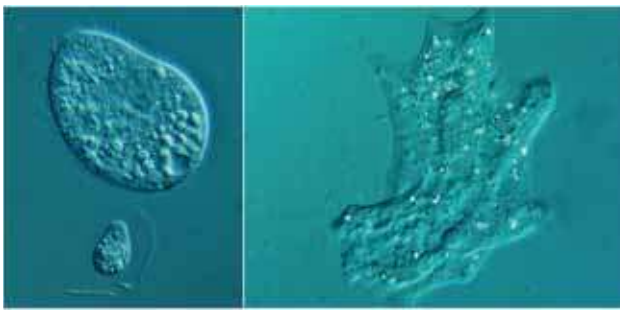
Obecność soli gwałtownie zmienia właściwości wody. Najbardziej oczywistą zmianą jest zmiana właściwości elektrycznych. Czysta woda byłaby izolatorem. Jeśli do wody morskiej trafi cząstka prawdziwej soli, to ulegnie ona rozpadowi zwanemu fachowo dysocjacją. W wodzie pojawi się więc dodatni kation i ujemny anion. Pojawią się więc ładunki elektryczne. Dzięki temu woda morska, względnie oceaniczna staje się świetnym przewodnikiem. Niektóre ryby wykorzystują tę właściwość wody morskiej do polowań. W organizmach żywych są mniej więcej te same jony i to w podobnych stężeniu co ładunki elektryczne. Jony są przez organizmy żywe wykorzystywane do większości procesów biologicznych, takich jak oddychanie czy procesy przewodzenia impulsów nerwowych. Jest to dobry punkt, aby postawić pytanie o powstanie życia. Otóż najprawdopodobniej powstało ono w wodzie morskiej. Jeśli pewna ilość wody morskiej została otoczona półprzepuszczalną błoną to otrzymujemy amebę. I tak to się najprawdopodobniej odbyło.

Obecność soli morskiej sprawia, że woda morska jest gęstsza od czystej wody. Gęstość czystej wody mierzona w temperaturze 3,98°C wynosi 1g/cm^3. Średnia gęstość wody morskiej wynosi 1,027 g/cm^3, czyli jest o ponad 2% wyższa od gęstości wody czystej. Można więc wykonać doświadczenie pokazujące, że woda słodka uniesie się na powierzchni wody słonej. Innym wynikiem obecności soli w wodzie morskiej jest obniżenie punktu zamarzania. Dzięki obecności soli w rejonach podbiegunowych obserwowano ciekłą wodę o temperaturze – 2,6°C.

Duży obieg wody

W tym miejscu można sobie zadać pytanie – dlaczego woda w morzu jest słona, czyli skąd w niej bierze się sól? O ile pytanie niektórym może wydać się godne dziecka, to odpowiedź na nie okazuje się być już bardziej złożona. Jest to bowiem pytanie o tzw. duży obieg wody. Tym mianem określa się cykl wymiany wody między oceanami, ziemią i atmosferą. Co roku uczestniczy w nim 557 000 km^3 wody, czyli 0,04% zasobów wodnych hydrosfery. Ponieważ jest to cykl zamknięty można opisywać go zaczynając od dowolnego momentu.

Zacznijmy więc od parowania wody z oceanu. Para wodna wychodząca z oceanu nie zawiera, a ściślej mówiąc zawiera bardzo mało soli. Po pewnym czasie woda ta albo spadnie z powrotem na powierzchnie oceanu, ok. 80% albo zostanie przeniesiona nad ląd i tam ulegnie



Rys. 5. Ameba to właściwie pęcherzyk wodny. (źródło: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ameba_003.jpg)

eprasa.pl 6365cfbfa2

skropleniu i opadnie. Większość z tej ilości wody trafi z powrotem do gleby a potem do rzek. W czasie tej podróży przez glebę woda morska wypłucze pewną ilość składników mineralnych. Wpadając do morza będzie zawierać pewną ilość soli, większą niż w momencie parowania. I takie jest źródło soli w oceanach.

Co ciekawe – bilans jonów w wodzie rzecznej różni się znacząco od bilansu jonów w wodzie morskiej, zwłaszcza pod względem ilości sodu, którego w wodzie rzecznej wyraźnie brakuje. Wspomniany mechanizm zapewnia wymianę wody w oceanach co 2800 lat. Cykl ten został opisany po raz pierwszy przez znanego skądinąd z dokonań astronomicznych Halleya. Cykl ten nie jest pełny. Gdyby mechanizm ciągłego dostarczania soli był jedynym procesem nasze morza byłyby już całkowicie martwe z powodu nadmiernego zasolenia. Na szczęście oceany mają dno, które jest w stanie absorbować jony, a więc usuwać sól, która dzięki temu wraca do litosfery.

Dodatkowo należy zaznaczyć, że długość cyklu wymiany wody nie odzwierciedla długości cyklu życia jonów. Tutaj każdy jon ma swoją „długość życia" – dla jonów sodu wynosi ona 260 000 000 lat. Atomy żelaza żyją tylko 140 lat. Nic więc dziwnego, że niedobór żelaza znacznie ogranicza wegetację w oceanach.

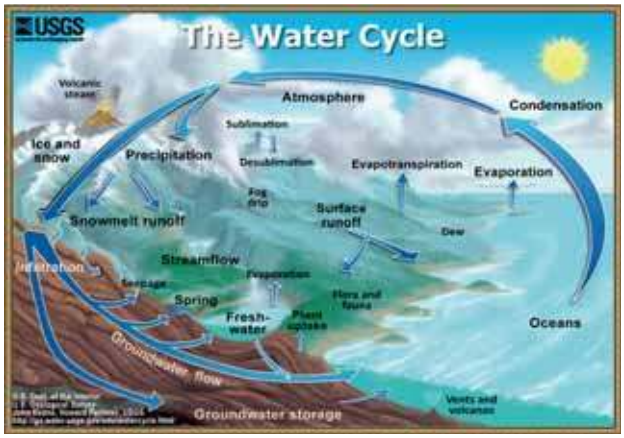
O formie życia obecnej na Ziemi zadecydował też fakt, że woda morska zawiera różne rozpuszczone gazy. Proporcje wagowe rozpuszczonych gazów są znacząco różne od proporcji w atmosferze. Jednym, a może najważniejszym, jest tlen. Tu należy uczynić pewną uwagę. O ile skład jonów jest w każdym miejscu oceanu zbliżony, to skład gazów już nie. Każdy gaz, w tym tlen, ma swój indywidualny rozkład. Tlenu najwięcej jest w górnych warstwach oceanu, po tym jego ilość maleje, aż do osiągnięcia minimum na głębokości 800 m. Potem ilość znów rośnie. Oczywiście są to parametry średnie i mogą zależeć od miejsca.

Aby znaleźć odpowiedź o przyczyny takiego rozkładu należy zadać sobie pytanie skąd wziął się tlen w oceanach? Otóż jego źródła są dwa. Pierwsze źródło to zachodząca w przypowierzchniowych warstwach oceanu fotosynteza. Drugim o wiele ważniejszym źródłem jest otaczająca ocean atmosfera. Podstawowym czynnikiem wtłaczającym tlen w ocean są fale.

Oba te czynniki mogą oddziaływać jednak tylko w górnych warstwach oceanów. Jak to się dzieje, że tlen jest jednak w obecny w całej objętości oceanów?

Prądy morskie

W tym momencie doszliśmy do niezwykle ważnego z punktu widzenia fizyki naszej planety pojęcia, mianowicie do pojęcia prądu oceanicznego. Co to takiego? Jeśli przeanalizujemy dynamikę wód oceanu to stwierdzimy, że wody oceaniczne są w nieustannym ruchu, zarówno względem siebie, jak względem otaczających je lądów. Przy czym ruch ten ma charakter warstwowy. Jak się okazuje wody powierzchniowe zazwyczaj płyną w innym kierunku niż warstwy wody położone w głębinach oceanicznych. Co powoduje ten ruch? Są to głównie różnice w gęstości wody wywołane różnym zasoleniem i temperaturą. Swoją rolę odgrywają też wiatry trące o powierzchnię oceanu.



Rys. 6. Duży cykl hydrologiczny, źródło.: https://en.wikipedia.org/wiki/Water_cycle

Rys 7. Fale załamując się wtłaczają powietrze do wnętrza oceanu. W tym momencie ściana wody działa jak potężny tłok. Fot – Dreamstime

Nie można zapominać też o wynikającej z obrotu Ziemi sile Coriolisa. Większość oceanicznej wody krąży w pewnego rodzaju obiegu zamkniętym zwanym globalnym pasem transmisyjnym. Co to ma wspólnego z dystrybucją tlenu? Otóż natlenione wierzchnie warstwy oceanu są zazwyczaj cieplejsze od warstw dolnych. Nie chcą więc opadać na dno. Jest to jednak prawdą tak długo aż wody oceaniczne dotrą do stref podbiegunowych. Wtedy następuje ich oziębienie i wody natlenione opadają w kierunku dna.

Na półkuli północnej proces tonięcia natlenionych wód zachodzi głównie na Atlantyku w Morzu Labradorskim i Grenlandzkim. Na półkuli południowej zaś w okolicy Antarktyki (Hołyst, 2007).

Występowanie wspomnianego cyklu jest zasadnicze z punktu widzenia życia. Tlen jest bowiem konieczny organizmom wodnym do oddychania. Bez tego cyklu na znacznych częściach oceanów istniałby niedobór tlenu. Taki stan wody morskiej nosi nazwę anoksji. Jego konsekwencją jest zanik życia w rejonach nią dotkniętych. Na szczęście od 13 tys. lat zjawisko to nie występowało na szerszą skalę, co jednak nie oznacza, że nie zachodziło w minionych epokach geologicznych.

Zawsze przy omawianiu stężenia tlenu w jakimś środowisku należy przedyskutować problem dwutlenku węgla jako produktu spalania i jednego z materiałów warunkujących fotosyntezę. Tak też będzie i tym razem. Należy jednak podkreślić, że czystego dwutlenku węgla w oceanie praktycznie nie ma. Dwutlenek węgla reaguje bowiem z wodą tworząc kwas węglowy. Dzięki temu ocean wychwytuje 1,4 mld ton CO_2 z atmosfery rocznie. Cząsteczki

eprasa.pl 6365cfbfa2

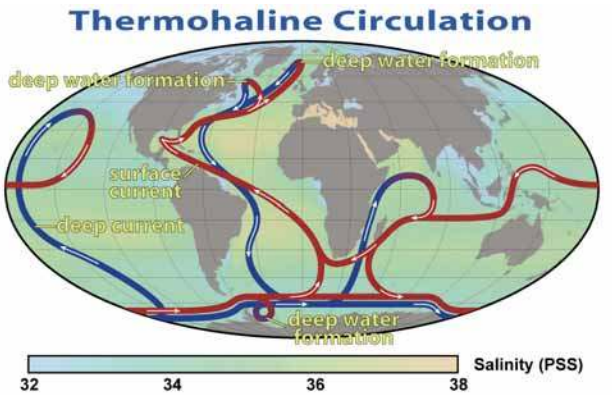


Fig. Globalny pas transmisyjny. Czerwone linie obrazują prądy powierzchniowe. Linie niebieskie głębinowe

kwasu węglowego dzielą się na aniony HCO_3^- lub CO_3^{2-}. Obecność kwasu węglowego stabilizuje PH oceanów. Stężenie jonów węglowych rośnie z głębokością. Spowodowane jest to opadaniem materii organicznej, która w głębszych warstwach oceanu ulega rozkładowi uwalniając jony węglowe. Duża część jonów wiąże się z wapniem tworząc $CaCO_3$ osiada na dnie i w ten sposób wraca do litosfery.

Prądy morskie mają też poważne znaczenie z punktu widzenia klimatu. Najbardziej znany jest tu wpływ prądu el-Ninio, który pojawia się okresowo i powoduje zmiany w temperaturach. Jeszcze ważniejszy jest prąd zatokowy, który ogrzewa zachodnią Europę. Z kolei zimny prąd Humboldta powoduje obniżenie temperatury w Peru.

Ocean jako chłodnica

Oceany charakteryzują się pewną temperaturą różną od zera K. Te banalne stwierdzenie oznacza, że pozostają w równowadze cieplnej z otoczeniem. Czyli poza utratą energii muszą ją jakąś otrzymywać. Źródła energii mogą być trzy. Po pierwsze – wnętrze Ziemi, po drugie – wymiana cieplna pomiędzy atmosferą a powierzchnią wody, po trzecie – pochłanianie energii świetlnej.

Aby odpowiedzieć sobie na pytanie skąd oceny pobierają energię wystarczy przeanalizować rozkład temperatur wody. Okazuje się, że temperatura powierzchni oceanu jest średnio o 3°C wyższa niż temperatura znajdującego się nad nią powietrza (Stenz, 1956). Z tego wynika, że głównym dostarczycielem energii cieplnej nie może być atmosfera. Schodząc w głąb oceanu stwierdzamy z kolei, że temperatura oceanu się obniża. Np. na głębokości 3 km pod powierzchnią Oceanu Spokojnego temperatura morska obniża się do poziomu 1,6 –2,2°C. Z tego wynika, że generalnie, źródłem energii oceanów nie jest wnętrze Ziemi. Pozostaje więc Słońce.

Analizując rozkład temperatury powierzchni oceanów możemy stwierdzić, że najwyższa temperatura występuje w okolicach równika. Na przykład temperatura powierzchni Morza Czerwonego jest rzędu 29°–30°C. Nie jest to dziwne, gdyż, kąt padania promieni słonecznych jest tam największy, czyli największa jest gęstość powierzchniowa padającej energii.

Najniższe temperatury ujemne występują oczywiście w okolicach biegunów. Tam woda morska (słona) może mieć temperaturę ujemną. W tym miejscu pozwolę sobie uczynić pewną dygresję od głównego nurtu naszych rozważań. Otóż z lekcji fizyki pamiętamy, że jeśli mamy do czynienia z dwoma zbiornikami o dwóch różnych temperaturach to możemy otrzymać silnik cieplny, silnik ten będzie w stanie wykonywać pracę polegającą np. na poruszaniu turbiny prądotwórczej. Jest to zasada pracy elektrowni opisanej po raz pierwszy w 1870 przez Juliusza Verne (Hołyst, 2016). Obecnie realizowany jest szereg takich inwestycji. Jedną z nich jest budowa elektrowni w południowych Chinach, gdzie ma powstać elektrownia o mocy 10 MW. Oczywiście najlepszym miejscem do realizacji takich inwestycji są te rejony, gdzie różnica pomiędzy temperaturą powierzchni wody a temperaturą wody na określonych głębokościach jest największa. Czyli elektrownie takie najlepiej lokalizować w okolicach równika.

Lepkość wody

Woda jest około 1000 razy gęstsza od powietrza i ma duży współczynnik lepkości. W wyniku tego stwarza duży opór poruszającym się w niej organizmom, zwłaszcza tym, które poruszają się z dużą prędkością. Kraby chodzące powoli po dnie tylko w znikomym stopniu odczuwają lepkość wody. Aby pokonać opór lepkość wody organizmy muszą zużywać dużo energii, a energia ze swojej natury jest cenna. Żywe organizmy muszą przybierać taki kształt, aby minimalizować straty energii. Jest to kształt opływowy. Laboratoryjne badania wykazały, że najlepszy kształt to głowa o małym promieniu i powoli zwężający się tułów. Taki jest właśnie kształt ryb.

Rys. Typowy opływowy kształt ryby. Foto – Dreamstime.

Aby zredukować opór trzeba uczynić jeszcze jedną rzecz – zrezygnować z wystających elementów ciała. Dlatego też np. delfiny mimo relatywnie dużego, większego niż człowiek mózgu, nie mogły wytworzyć cywilizacji. Konieczność pływania w wodzie skutecznie powstrzymała je od wykształcenia chwytnych kończyn, które to z kolei mogłyby posłużyć do wytwarzania narzędzi.

Duża wartość ciepła właściwego wody w porównaniu z pojemnością powietrza powoduje to, że oceany stosunkowo trudno ogrzać. Dodatkowo do wyrównania temperatury oceanów przyczynia się występowanie ruchów turbulentnych. Skutkiem tego temperatura powierzchniowych wód oceanicznych tylko nieznacznie zmienia się w cyklu dobowym. W szerokościach umiarkowanych zmiany te są rzędu 0,1-0,2°C. W rejonach zwrotnikowych wzrasta do 0,5°C. Tak więc nie należy się dziwić, gdy wchodząc po zmroku na Kubie do wody stwierdzimy, że woda jest ciepła. Im mniejszy zbiornik wodny, tym amplituda zmian dobowych staje się większa.

Zbigniew Wiśniewski

LITERATURA

[1] Hołyst, „Anatomia Oceanów", Wiedza i Życie, 2008 nr 11 p.46-49.
[2] A. Hołyst, „Prąd z gorących mórz", Wiedza i życie nr 3, p 44. 2016.
[3] K. Kożuchowski. „Meteorologia i Klimatologia" PWN Warszawa 2009.
[4] S.O.R. Lindsey „2012 State of the Climate: Humidity" Climate.gov (2013) https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/2012-state-climate-humidity
[5] E. Stenz, „Ziemia" PWN, 1956).
[6] G. L. Stephens, L'Ecuyer (2015), „The Earth's energy balance", Atmospheric Research, 166 (2015), 195–203
[7] A. C. Duxbury, A. B. Duxbury, K. A. Swerdrup, „Oceany świata", PWN 2002, WARSZAWA

eprasa.pl 6365cfbfa2

Nasz obraz świata jest w dużej mierze ukształtowany przez dokładne rozwiązania naszych teorii[1]. Niestety dokładne rozwiązania to rzadkość.

Pływy

Jerzy **Kuczyński**

W typowej sytuacji nie da się uzyskać takiego rozwiązania a powodem jest z zasady komplikacja problemu. Inaczej mówiąc dokładne rozwiązania istnieją tylko w skrajnie uproszczonych sytuacjach. A takie uproszczenie najczęściej oznacza zgubienie typowych cech. Niestety w dydaktyce takie uproszczone rozwiązania są powszechnie wykorzystywane. Raz, że mają urok dokładności a drugi raz, że można je zrozumieć. I tu pojawia się problem. Zrozumiawszy jakiś model (a wszystkie nasze teorie są w jakimś sensie jedynie modelami) mamy tendencję do ekstrapolowania jego znaczenia poza rzeczywisty zakres jego stosowalności. Wynik jest dosyć przerażający[2] – nasz obraz rzeczywistości fizycznej jest raczej karykaturą niż przybliżeniem realnego świata. Oczywiście w pracy naukowej to nie przeszkadza, bo w tej ostatniej liczą uzyskane wyniki a nie wyobrażenia Autorów. Często wyraża się to nieco poetyckim stwierdzeniem, że nasze równania są mądrzejsze od nas samych.

Niestety, w dydaktyce i popularyzacji nie jest to już prawdą. Świat jest jeden i jeden też powinien być jego obraz. Przynajmniej według dydaktyków. Stąd podręczniki szkolne są zapełnione mnogością kategorycznych stwierdzeń, których związek z rzeczywistością jest co najmniej wątpliwy[3]. Wynika to w dużej mierze z wspomnianej już ekstrapolacji prostych i zrozumiałych modeli na obszary, gdzie modele te tracą swą adekwatność.

Jednym z takich sztandarowych rozwiązań, które jest indoktrynowane uczniom w szkole jest ruch punktu materialnego w stacjonarnym polu grawitacyjnym o dużej symetrii. Własności tego ruchu są w szkole szeroko komentowane i tak wrastają w powszechną świadomość, że nawet wybitni fizycy czasem zapominają, że rzeczywistość jest nieco bardziej skomplikowana. Autorowi znany jest przypadek stwierdzenia przez wybitnego fizyka, że „w polu grawitacyjnym wszystkie ciała, niezależnie od swoich rozmiarów poruszają się jednakowo” [4].

Dlatego warto problem nieco przybliżyć. Raz by zauważyć jak łatwo o nieuzasadnione ekstrapolacje a drugi raz, bo rzecz sama w sobie wydaje się interesująca i jak się przekonamy ma ogromne praktyczne znaczenie.

Zacznijmy od zupełnie prostego modelu hantli – dwu punktów materialnych o masie m/2 połączonych sztywną i nieważką belką o długości l[5]. Łatwo zauważyć ze siła działająca na taki obiekt jest mniejsza niż na punkt materialny o tej samej masie. Po prostu siły działające na elementy ciała nie są równoległe więc dodają się wektorowo do wektora o module mniejszym od sumy modułów! Przy okazji pojawia się oczywiście siła ściskająca takie ciało.

Nietrudno zauważyć, że można sformułować całkowicie ogólne twierdzenie – siła grawitacyjna działająca na rozciągłe ciało jest mniejsza lub równa sile działającej na punkt materialny o tej samej masie. I oczywiście równość zachodzi dla jednorodnego pola.

Można przy tym zauważyć, że rzeczywiste pola są niejednorodne – jednorodne pole grawitacyjne z zasady wynika z wyboru układu odniesienia i oczywiście może być bez trudu usunięte przez odpowiedni dobór tego układu.

To oczywiście einsteinowska zasada równoważności. Pola możliwe do globalnego „odcechowania” mają więc dość wątpliwą realność[6], co oczywiście nie przeszkadza użyciu ich jako przybliżenia. Często znakomitego, ale jednak przybliżenia. Realne pola są niejednorodne a ciała w nich się poruszające mają skończone rozmiary i dlatego pewna wiedza o własnościach ruchu ciał rozciągłych w niejednorodnym polu jest wskazana.

Okazuje się, że dla ciała symetrycznego ruch w polu centralnym może odbywać się w płaszczyźnie i tak, by oś symetrii była prostopadła do tej płaszczyzny – siła jest wówczas siłą centralną[5] co znakomicie ułatwia rachunki. Rozważmy ruch hantli spełniający te dość szczególne warunki. Konkretnie siła wypadkowa na środek ciężkości hantli wynosi

$$F = \frac{G \cdot m \cdot M \cdot \alpha}{r^2} \quad (*)$$

gdzie

$$\alpha = \frac{r}{\sqrt{r^2 + \frac{l^2}{4}}}.$$

eprasa.pl 6365cfbfa2

W powyższych wzorach r jest promieniem orbity a M masą centrum pola (masa planety czy gwiazdy). Oczywiście w przypadku ruchu wokół typowej planety promień orbity jest rzędu tysięcy kilometrów a rozmiar hantli (satelity) co najwyżej setek metrów. Stąd α jest bliskie jedności i przybliżenie punktem materialnym (zignorowanie rozmiarów) jest bardzo dobrym przybliżeniem. W krótkich odcinkach czasu, bo globalne własności ruchu są inne.

Porównując siłę (*) z siłą odśrodkową stwierdzimy, że hantla porusza się z nieco mniejszą prędkością od znajdującego się na tej samej orbicie punktu materialnego (bo siła jest mniejsza). Poruszający się z tym samym okresem punkt materialny będzie poruszać się nieco wyżej. Gdyby rozważyć hantlę mogącą zmieniać swoje rozmiary to okaże się, że można zmieniając rozmiary zmieniać orbitę!

Zacznijmy od hantli „zwiniętej" do punktu materialnego poruszającej się po kołowej orbicie. Rozwijając ją w opisany powyżej sposób, czyli będąc nadal pod wpływem siły centralnej, hantla znajdzie się w sytuacji, gdy prędkość jest zbyt duża dla danego położenia. Hantla zachowując moment pędu znajdzie się na orbicie, w której zacznie się zwiększać odległość od centrum. W przybliżeniu będzie to elipsa, ale dokładniejsza analiza (p. książka[5]) pokaże, że jest to nieco „spiczasta" elipsa – bliżej centrum mimośród jest nieco mniejszy a apocentrum nieco większy.

W naszych rozważaniach ta własność choć skądinąd oczywista – za chwilę wykażemy możliwość ucieczki do nieskończoności, a więc w efekcie do ruchu po prostej (po ramieniu hiperboli) – nie ma chwilowo większego znaczenia. Gdy ciało znajdzie się w apocentrum znowu zwijamy hantlę do punktu. Oczywiście siła rośnie i ściąga hantlę bliżej centrum zwiększając jej prędkość a ten fragment ruchu odbywa się już po elipsie.

Znalazłszy się w perycentrum znowu rozwijamy ramiona hantli. Znowu maleje siła, prędkość jest zbyt duża dla tego miejsca i hantla oddala się od centrum. Tym razem nieco dalej niż poprzednio. Powtarzając wielokrotne tą operację możemy w końcu oddalić się „do nieskończoności".

Warto zrobić dwie uwagi. Po pierwsze rozwijanie i zwijanie ramion hantli jest niezbyt praktyczne. Dużo zgrabniej zrealizować ten sam efekt przez odpowiedni obrót hantli np. w apocentrum obrót hantli powoduje, że ramiona są równoległe do płaszczyzny orbity a w perycentrum prostopadłe. Zmieniając nieco okres obrotu (np. przy pomocy wewnętrznego koła zamachowego) można dopasowywać odpowiednie czasy.

Rachunek dotyczący takiego ruchu jest nieco bardziej skomplikowany, ale widać, że to będzie działać. Zdanie sobie sprawy z tego jest o tyle istotne, że prawdziwe ciała w polu grawitacyjnym się obracają i zjawiska dotyczące obracającej się hantli mogą być modelem dla takich ruchów.

Druga uwaga ma charakter dydaktyczny. Zauważmy, że aktywnie działamy „wewnątrz" ciała a skutki, i to dość drastyczne, dotyczą ruchu „zewnętrznego". Przy okazji dodajmy, że „ucieczka do nieskończoności" zachodzi kosztem pracy związanej z rozwijaniem i zwijaniem hantli a w przypadku ciała obracającego się kosztem energii związanej z obrotem. Oznacza to, że spotykane powszechnie w podręcznikach szkolnych twierdzenie, że siły działające między ciałami układu są siłami wewnętrznymi, jest nieprawdziwe.

Tak jest jedynie w przypadku, gdy układ nie jest zanurzony w niejednorodnym polu. W przypadku gdy tak jest, siły te mają z zasady składową zewnętrzną. Prawda, że w typowych sytuacji składowa ta jest bardzo mała. I tak Bielecki podaje, że dla hantli o rozmiarach kilometra ucieczka z obity wokół Ziemi jest możliwa po 10^8 obiegach a pamiętajmy, że im większa wielka półoś orbity tym okres dłuższy. Tym samym czas takiej operacji to przynajmniej setki lat i to pod warunkiem, że końcówkę operacji wykonamy już przy pomocy normalnego silnika odrzutowego.

Z drugiej strony można sobie wyobrazić ruch w polu o bardzo dużej zmienności pola np. w pobliżu czarnej dziury czy gwiazdy neutronowej. Wówczas opisane powyżej własności ruchu ciał rozciągłych trzeba uwzględniać a i konstrukcja „grawilotu", bo tak Bielecki nazywa ten sposób napędu statki kosmicznego, może okazać się uzasadniona.

Jest jeszcze jeden argument za zrozumieniem zjawisk związanych z ruchem ciał rozciągłych w niejednorodnym polu grawitacyjnym. Otóż są ciała, które mają bardzo dużo czasu, a które nas zdecydowanie interesują. To oczywiście naturalne ciała niebieskie. Układ Słoneczny ma około 4,5 miliarda lat i niewątpliwie rozciągłe ciała jakim są planety i księżyce poruszają się od takiego właśnie czasu. Aby zrozumieć ich ewolucję musimy wspomniane wyżej własności uwzględnić. Mało tego okazuje się, że ponieważ ciała te mają bardzo znaczne rozmiary tysięcy kilometrów niektóre efekty działania sił pływowych, bo tak właśnie nazywamy siły związane ze skończonymi rozmiarami ciał poruszających się w niejednorodnym polu grawitacyjnym, są nie tylko łatwo widoczne, ale i mają bardzo praktyczne znaczenie.

W pierwszym rzędzie to pływy morskie. Wprawdzie Polakom zjawiska te są mało znane, bo najbliższe nam morza Bałtyk, Adriatyk i morze Tyrreńskie wykazują bardzo małe pływy. Wbrew spotykanym w szkolnych podręcznikach twierdzeniu nie chodzi o to, że morza te mają słaby kontakt z oceanem światowym. Rzecz jest tego samego typu jak ruch huśtawki. Po prostu morza te mają okres drgań niewspółmierny z dobą. Dlatego rozhuśtanie ich przy pomocy siły zmieniającej się w tym okresie jest mało efektywne.

Dobitnym tego przykładem jest zatoka Botnicka. Znajduje się daleko od o Cieśnin Duńskich i jest od Bałtyku oddzielona Alandami a jednak pływy na tym akwenie wprawdzie dalej niewielkie (ok. połowy metra) są jednak wyraźniejsze niż na Bałtyku Właściwym czy Zachodnim. Do zgrubnego oszacowania, kiedy pływ na danym akwenie będzie duży może posłużyć wzór na okres drgań własnych akwenu[7]

$$T = \frac{4L}{\sqrt{g \text{ i } h}} \quad (**)$$

gdzie T oznacza okres L wymiar charakterystyczny, h typową głębokość akwenu a g przyspieszenie ziemskie.

Oczywiście, wzór (**) stanowi jedynie zgrubne oszacowanie, dość dobrze zgadzające się z rzeczywistością jedynie w przypadku długich i mających w miarę równą głębokość zatok. W przypadku okresu drgań własnych bliskiego poło-

eprasa.pl 6365cfbfa2

wie doby, tak jak jest o np. w przypadku zatoki Bristolskiej, mamy sytuację rezonansową i pływy we wspomnianej zatoce dochodzą do 15 metrów – w ciągu połowy doby poziom morza zmienia się o zbliżoną[8] wartość, co oczywiście powoduje bardzo silne i niebezpieczne dla żeglugi prądy.

Rzecz bardzo ciekawa i dość bliska Autorowi jednak umiarkowanie związana z ruchami ciał niebieskich. Jest jednak jasne, że w dłuższym czasie siły pływowe wpływają na ruch ciał niebieskich. To właśnie z ich powodu Księżyc oddala się od Ziemi o około 3,4 cm na rok. Warto zwrócić uwagę na dokładność tego pomiaru. W ciągu miesiąca Księżyc zmienia odległość od Ziemi o kilkadziesiąt tysięcy kilometrów.

By znaleźć wspomniany efekt należało dokonać naprawdę doskonałych pomiarów (odbicie światła laserowego od pozostawionego na Księżycu lustra) i rachunków (wyłuskanie z ruchów Księżyca wspomnianego efektu). Znając własności ruchu hantli w centralnym polu grawitacyjnym możemy twierdzić, że rozumiemy, dlaczego Księżyc się oddala. Możemy też znaleźć źródło energii niezbędnej do takiego oddalania się. Jest nim energia ruchu obrotowego. I nad tym warto chwilę pomyśleć.

Gdy dwa ciała wzajemnie siebie obiegają to każde wytwarza na tym drugim falę pływu. Fala ta jest skierowana z grubsza w kierunku ciała wytwarzającego pływ. Z grubsza, bo zawsze występuje pewne opóźnienie. Dodatkowo występuje jeszcze fala po przeciwnej stronie spowodowana siłą odśrodkową. Fale pływu biegną więc po powierzchni ciała w wyniku tarcia rozpraszając energię. Siła tarcia z oczywistych względów jest skierowana przeciwnie do ruchu fali. Jeżeli więc ruch obrotowy jest szybszy od obiegowego, co jest typową sytuacją, to efektem jest hamowanie obrotu ciała.

Można wyobrazić sobie sytuację, gdy ruch obrotowy jest wolniejszy lub wręcz odbywa się w przeciwnym kierunku do ruchu obiegowego. Wówczas siły tarcia spowodują wzrost prędkości obrotu a w przypadku obrotu w przeciwnych kierunkach zmuszają do obrotu w tą samą stronę (oczywiście po pewnym, raczej dość długim czasie). Ostatecznym efektem jest zrównanie okresów ruchu obiegowego i obrotowego. Wówczas ciała obracają się w ten sposób, że fala pływowa stoi w bezruchu w stosunku do powierzchni ciała, będąc zwrócona w kierunku ciała wytwarzającego pływ. Z taką sytuacją mamy do czynienia na Księżycu. Jest on zwrócony jedną stroną w kierunku Ziemi, a druga strona Księżyca jest dla nas niewidoczna.

Jeżeli ciała mają zbliżone masy to oba zostają „zatrzymane". Z taką sytuacja mamy do czynienia na Plutonie. Planeta i jej księżyc Charon obracają się tak jakby były powiązane sztywnym prętem. W przypadku Ziemi i Księżyca lżejszy Księżyc został zatrzymany a masywniejsza Ziemia dalej się obraca. Jednak obraca się coraz wolniej i wg pewnych ocen za czasów dinozaurów doba trwała około dwudziestu minut krócej.

Pozostaje jeszcze problem libracji. Jak wiemy ciała niebieskie poruszają się w przybliżeniu po elipsach. Oznacza to, że prędkość kątowa w ruchu obiegowym nie jest stała (stały jest moment pędu). Z kolei prędkość obrotowa jest stała. „Średnio" obie prędkości są równe, ale w ciągu obiegu wokół Ziemi Księżyc przez część obiegu obraca się szybciej niż wynosi odpowiedni kąt dla obiegu. Na odwrót przez część okresu obiegu obrót spóźnia się. Nazywa się to libracją i umożliwia obserwację około 59 % powierzchni Księżyca[9].

Wspomniana libracja ma bardzo istotne znaczenie w przypadku układów złożonych z kilku masywnych ciał powiązanych siłami grawitacyjnymi. W szczególności w układzie Jowisza energia ruchu obiegowego księżyców przepływa między nimi powodując eliptyczność orbit a w konsekwencji ruch fali pływowej i grzanie wnętrz dużych wewnętrznych księżyców w wyniku tarcia pływowego. Tarcie w przypadku Io jest tak wielkie, że wulkany chłodzące wnętrze wyrzucają pyły na wysokość kilkuset kilometrów nad powierzchnię księżyca a sama powierzchni w ciągu około tysiąca lat jest całkowicie przykrywana lawą wulkaniczną.

Dużo słabsze tarcie pływowe na Europie jest wystarczające by podgrzać jej wewnętrzny ocean i dostarczyć na tyle dużo energii by zasilić energetycznie hipotetyczną biosferę na tym księżycu. Nawet niewielki Enceladus (księżyc Saturna) jest grzany wystarczająco mocno, by oszacowania temperatury w pobliżu dna jego oceanu (też podpowierzchniowego) przekraczały 100 stopni Celsjusza, a więc były zbliżone do tych w pobliżu „oaz życia" w ziemskich oceanach.

Podsumowując powyższe rozważania zauważmy, że w miarę niewielkie uogólnienie rodzaju ciała poruszającego się w polu grawitacyjnym ujawniło całkiem sporą ilość zjawisk nie występujących w przypadku punktu materialnego. I dzięki temu dość łatwo było zrozumieć sporo istotnych zjawisk. Nie inaczej byłoby przy pewnym uogólnieniu każdej znanej teorii. Stąd warto pamiętać, że nasze wyobrażenie świata związane ze znanymi dokładnymi rozwiązaniami jest w pewien sposób wypatrzone.

Jerzy Kuczyński
Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach

LITERATURA

[1] L. Piela „Idee chemii kwantowej" PWN.
[2] W momencie, gdy zdamy sobie z tego sprawę!
[3] Autor od kilkunastu lat zajmuje się w PAU recenzowaniem podręczników szkolnych i dlatego musiał dość uważnie przeczytać większość obowiązujących w ciągu tego okresu podręczników szkolnych do fizyki. Ilość absurdów, które tam znalazł jest zadziwiająca. Przy czym nie dotyczy to tylko podręczników fizyki. Nie inaczej jest w podręcznikach historii, chemii czy biologii, których recenzji wysłuchał. Wydaje się, że trochę inaczej jest w przypadku literatury, gdzie recenzenci wydają się znajdować względnie mało jawnych błędów. Ale może to wynikać z pewnej tolerancji polonistów na odmienne obrazy świata. W końcu wybitnymi dziełami literackimi jest i „Lalka", i „Oda do młodości" choć przecież konsystentnego obrazu rzeczywistości nie tworzą. Na starość autor do pewnego stopnia zgadza się z tym sposobem patrzenia na świat.
[4] Oczywiście w przypadku Profesora wynikało to z roztargnienia i zostało natychmiast sprostowane. Niestety w szkolnych podręcznikach tej klasy błędów znajdziemy sporo a prostowane już nie są.
[5] W. W. Bielecki „Szkice o ruchach ciał niebieskich" PWN 1976. Rozważania dotyczące ruchu hantli w polu centralnym są inspirowane zawartością tej znakomitej książki. Autor zachęca wszystkich do zapoznania się z tą uroczą książką przedstawiającą mało znane i bardzo ciekawe fakty z wydawałoby się dobrze znanej i zupełnie nieciekawej dziedziny jaką jest mechanika klasyczna.
[6] Taki pogląd wyrażają Landau i Lifszyc w swojej „Teorii pola", PWN.
[7] W. W. Driemljug „Oceanografia nautyczna", Wydawnictwo Morskie 1974. Ten sam wzór można znaleźć w bardzo dobrej książce Lisieckiego.
[8] Zależną, w pierwszym przybliżeniu, od fazy Księżyca.
[9] E. Rybka „Astronomia ogólna" PWN. Tak naprawdę rzecz jest nieco bardziej skomplikowana i rozróżniamy trzy rodzaje libracji. Rzecz jest klasyczna i wyjaśnienie znajdziemy w każdym podręczniku astronomii ogólnej.

eprasa.pl 6365cfbfa2

ENERGYLANDIA

ZORGANIZUJ SZKOLNĄ WYCIECZKĘ DO NAJLEPSZEGO PARKU ROZRYWKI W POLSCE!

Energylandia to synonim najwyższego BEZPIECZEŃSTWA

Energylandia cechuje się także najwyższym bezpieczeństwem. A to dlatego, że w każdym Parku Rozrywki kwestie bezpieczeństwa powinny być priorytetowe i tak właśnie jest tutaj. Każde dostępne urządzenie posiada odpowiednie atesty, a cały kompleks otrzymał międzynarodowy certyfikat ISO 9001, który otrzymują organizacje spełniające szczególne kryteria dotyczące zarządzania jakością.

Ponadto kadra pracująca w obiekcie to doświadczone osoby, które zostały rzetelnie wyszkolone. Ogromną wagę przywiązują do tego, by żadne dziecko nie wydostało się poza obiekt bez opieki dorosłej osoby.

Dzieci mogą korzystać wyłącznie z atrakcji dostosowanych do ich wieku oraz wzrostu, a w parku wodnym pracuje kilkunastu profesjonalnych ratowników, którzy bez przerwy strzegą bezpieczeństwa Gości.

Olbrzymi wybór rozmaitych atrakcji

Park Rozrywki Energylandia składa się z pięciu różnych stref tematycznych i odznacza się ogromnym wyborem dostępnych form rozrywki. Wystarczy jeden bilet, by otrzymać wstęp do kilkudziesięciu różnych atrakcji zajmujących aż 30 hektarów!
Systematycznie odbywają się tu pokazy odważnych kaskaderów i wygimnastykowanych akrobatów, edukacyjne spektakle dla najmłodszych oraz musicale. Uświadczysz także projekcji interesujących filmów, a także zabierzesz podopiecznych na edukacyjne i artystyczne warsztaty. Dzieci mogą również wybrać się do laboratorium szalonego naukowca.

Rada

Jeśli poszukujesz miejsca na wycieczkę szkolną, podczas której żaden uczeń nie będzie się nudził to ENERGYLANDIA idealnie się do tego nadaje. To wszystko czeka na Twoich podopiecznych w Zatorze, tylko pół godziny od Krakowa!

Oszczędzaj!

Grupy szkolne
mogą liczyć na specjalne ceny już od 39 zł /os. oraz posiłek GRATIS!
Nauczyciele i kierowcy płacą tylko 1 zł za bilet.
Parking dla autokarów jest bezpłatny!

Roller coastery, tropiki i ekstremalne emocje

Najmłodsi Goście z pewnością będą przeszczęśliwi, mogąc spędzić czas w stworzonej specjalnie dla nich Bajkolandii. Przeżyją niesamowite przygody na roller coasterach dostosowanych do ich wieku. Dla młodzieży i dorosłych idealna będzie strefa ekstremalna, w której emocje zdrowej adrenaliny i radości naprzemiennie się ze sobą mieszają. Mieści się tu największy w Europie Mega Coaster – Hyperion, a także najszybszy na świecie wodny Roller Coaster Speed! Dla spragnionych tropikalnych doznań, doskonale sprawdzą się strefy Tropical Fun i Water Park. Ogromny obszar z najróżniejszymi basenami i kilkunastoma zjeżdżalniami. W upalne dni odkryty park wodny zapewni przyjemnie ochłodzenie.

WWW.ENERGYLANDIA.PL

eprasa.pl 6365cfbfa2

Prenumerata 2020
Jeszcze zdążysz!

Wiemy, jak poruszyć wyobraźnię

Formularz zamówienia na: www.aspress.com.pl/prenumerata-2020/

eprasa.pl 6365cfbfa2